PAGE NOT AVAILABLE

)280
505
05
Annexes

Library of
Princeton University.

Dei Sub Numine Viget

Brackett Library

Palmer Physical Laboratory

Presented by
Stephen S. Palmer
David B. Jones
Thomas D. Jones

Bisaolie

CONGRÈS INTERNATIONAL

D'ÉLECTRICITÉ

(PARIS, 18-25 AOUT 1900).

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
31806 Quai des Grands-Augustins, 55.

International electrical congr.

EXPOSITION UNIVERSELLE INTERNATIONALE DE 1900.

CONGRÈS INTERNATIONAL D'ÉLECTRICITÉ

(PARIS, 18-25 AOUT 1900).

ANNEXES

PUBLIÉES PAR LES SOINS

DE

M. É. HOSPITALIER, RAPPORTEUR GÉNÉRAL.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55

1903

CONGRÈS INTERNATIONAL
D'ÉLECTRICITÉ.

PARIS. — 1900.

ANNEXES.

PREMIÈRE SECTION.

REDRESSEMENT DES COURANTS ALTERNATIFS;

PAR M. HILDBURGH.

Le redressement des courants alternatifs peut se faire de trois manières différentes :

1° Par des moyens mécaniques : transformateurs rotatifs, convertisseurs, collecteurs tournants;

2° Par des moyens physiques : lampes à arc utilisant des électrodes hétérogènes, emploi de courants dissymétriques dans l'arc, action d'un aimant sur l'arc, étincelle jaillissant entre une pointe et un plan, tubes à vide avec électrodes hétérogènes (joint en cuivre, palladium-aluminium), propriétés électromagnétiques du bismuth, pseudo-conduction asymétrique;

3° Par des moyens chimiques (dus à l'apparition d'une forte

(RECAP) 9260 505

242387

résistance pour les courants se dirigeant dans un certain sens, ou à l'effet de la force contre-électromotrice de polarisation); on utilise dans ce but des électrodes hétérogènes plongeant dans l'acide sulfurique concentré, grande électrode ou petite électrode employées avec la haute tension. Un exemple frappant se rencontre avec les voies d'eau dans l'isolant des câbles sous-marins, voltamètre à lames d'aluminium, voltamètre à lames de magnésium et de fer chromé, électrode recuite et électrode platinée plongeant dans l'acide sulfurique dilué, électrode en or et électrode de platine dans l'acide sulfurique.

L'effet asymétrique de ces moyens chimiques donne un résultat qui dépend beaucoup des conditions de l'expérience, tant de la température des solutions que de la pression atmosphérique et de la différence de potentiel aux bornes.

Les conducteurs asymétriques peuvent être disposés : pour donner des pulsations positives dans un circuit ou négatives dans un autre; pour transformer des courants polyphasés en courant de même sens.

Les qualités que doit remplir un conducteur asymétrique sont : l'irréversibilité, l'automaticité; il ne doit pas être générateur; il doit s'opposer instantanément au passage d'un courant dans la mauvaise direction, il ne doit pas être un organe mécanique, il doit être bon marché et d'un entretien peu élevé; il doit fonctionner avec toute l'échelle habituelle des fréquences et des tensions.

Un élément constitué par une petite électrode en aluminium plongeant avec une électrode de platine dans l'acide sulfurique dilué formera un conducteur asymétrique fonctionnant à une tension relativement élevée par suite de la formation d'une couche résistante d'alumine à la surface de l'aluminium.

L'auteur a trouvé que si l'électrode de platine est petite et celle en aluminium beaucoup plus grande, et si la force électromotrice est maintenue assez basse, généralement au-dessous de 2 volts, on remarque qu'il y a asymétrie dans l'autre sens, causée par la dissolution de l'aluminium engendrant un couple platine-aluminium. En effet, l'élément peut fournir du courant dans cette direction en usant son électrolyde et son électrode d'aluminium. Cet effet ne tarde pas à cesser au bout de quelques instants, la surface

de l'aluminium se recouvrant peu à peu d'une légère couche d'hydrate.

L'auteur a également remarqué un autre cas de réversibilité de la conduction asymétrique. Un élément étant constitué par une petite électrode de platine et une large électrode constituée par du gaz hydrogène, comme dans un voltamètre, laisse passer les courants de basse tension assez facilement; mais, si l'on élève la tension aux bornes assez haut pour produire une étincelle explosive, l'asymétrie est renversée.

Applications des conducteurs asymétriques. — Les applications de ces conducteurs paraissent être restreintes, car on ne doit pas oublier qu'ils ne peuvent être appliqués qu'à des courants peu intenses et que, de plus, le courant est simplement redressé, sa force électromotrice variant constamment entre zéro et le maximum.

Un tel courant est applicable aux lampes à arc ou aux opérations électrolytiques dans lesquelles une force contre-électromotrice se présente (cas de l'affinage du cuivre), mais pour la commande des électro-aimants ou la charge des accumulateurs, d'autres transformateurs sont nécessaires.

Un électro-aimant excité avec du courant redressé produit une attraction constamment variable; ces appareils doivent avoir des noyaux et des armatures en fer lamellé. Les batteries d'accumulateurs que l'on désirerait charger avec ces courants devraient être munies d'appareils évitant la décharge de la batterie quand la tension d'alimentation est plus faible que celle des accumulateurs.

On peut admettre, d'une façon générale, que le rendement des appareils redresseurs électrolytiques est en raison inverse de leur résistance intérieure; de plus, pour chaque redresseur, il existe un régime pour lequel le rendement passe par un maximum.

L'auteur a remarqué cependant que le bon fonctionnement d'un redresseur électrolytique dépend essentiellement de la présence d'une forte densité de courant au moins sur l'une des électrodes, condition avec laquelle souvent une faible résistance intérieure est incompatible; il en résulte qu'il est désormais nécessaire de n'employer les conducteurs asymétriques que lorsque le prix de l'énergie est un facteur négligeable.

La télégraphie emploie avantageusement les conducteurs asymétriques pour certains cas particuliers; M. Ducretet, en 1874, proposa un système de télégraphie duplex dans lequel des *clapets* électrolytiques constitués par des lames d'aluminium étaient utilisés.

De nombreux systèmes, dans lesquels les demi-périodes positives et négatives d'un courant alternatif sont séparées au départ et à l'arrivée, utilisent des conducteurs asymétriques; l'auteur a pu ainsi organiser des postes marchant en duplex, diplex ou en multiplex.

Pour les applications industrielles dans lesquelles des courants intenses sont employés, on a généralement recours aux appareils redresseurs mécaniques.

Tesla, en 1899, proposa cependant l'emploi de conducteurs asymétriques pour la charge des accumulateurs ou pour des circuits de lampes à arc. M. Pollak songea à employer des clapets électrolytiques en aluminium pour empêcher la décharge des accumulateurs vers la dynamo de charge lorsque la force électromotrice vient à diminuer.

Le laboratoire paraît être plutôt le domaine des applications des clapets électriques; c'est ainsi que pour l'étalonnage des appareils à courant alternatif, on peut les placer en circuit avec des appareils à courant continu. M. Bastian, par exemple, installa un appareil de mesure à courant continu sur du courant alternatif en interposant un élément à électrodes en aluminium dans le circuit.

Pupin a utilisé les conducteurs asymétriques à force contre-électromotrice pour déceler la présence des ondes hertziennes. Ryan et Scattergood ont publié une méthode pour tracer les courbes du courant alternatif dans laquelle toutes les demi-périodes sont supprimées, grâce à l'interposition d'un élément à lames d'aluminium. Kalischer a eu l'idée d'employer les clapets électrolytiques pour adapter le courant alternatif aux bobines de Ruhmkorff en en faisant du courant interrompu; enfin Zenneck a imaginé une méthode pour doubler la fréquence d'un courant alternatif en le faisant passer dans un redresseur et en envoyant le courant ainsi redressé dans le primaire d'un transformateur, la période du courant secondaire devenant moitié moindre de celle du courant primaire.

Il n'est pas jusqu'à certaines méthodes employées par l'auteur pour mesurer la conductivité des électrolytes qui n'utilise les conducteurs asymétriques; des indicateurs de terre pour les lignes à courant alternatif peuvent être également construits, et une foule d'autres petites applications pourront trouver dans les redresseurs électrolytiques le principe de leur fonctionnement.

APPLICATION MÉCANIQUE DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES;

PAR M. FRANÇOIS WEYDE.

En poursuivant l'étude de l'hypothèse de Maxwell et de ses adeptes sur le mécanisme de l'électricité, l'auteur a essayé de donner une explication simple de l'effet voltaïque et des phénomènes de la pile galvanique à l'aide d'un mode de représentation qui utilise uniquement les lois connues de la Mécanique.

Je n'oserai pas prétendre que les explications que je vais donner représentent précisément les actions de la mécanique éthérienne et intermoléculaire, d'autant moins que je tâcherai de remplacer l'expression mathématique non seulement par la lourde et lente expression géométrique, mais par des images simplifiées et même par des modèles mécaniques.

Je serai donc forcé de m'abstenir de toutes les subtilités d'une théorie complète et de ne montrer que des dessins purement schématiques. Et là encore je serai forcé d'accepter une figure matérielle pour donner un certain aspect à cette hypothèse, à laquelle le traitement purement mathématique laisse encore toute sa légèreté et son ampleur.

Si donc on représente les molécules des corps par des groupements et des paquets de globules relativement gros, et si l'on place les cellules tourbillonnantes de l'éther entre ces globules dans leurs interstices, cela ne sera qu'une manière simplifiée pour pouvoir exprimer par le dessin un arrangement qui, dans la nature, pourrait aussi être autrement. Il se pourrait que ces molécules matérielles soient elles-mêmes entourées d'une sphère

vibrante composée d'éther, ou bien les molécules matérielles qui nous sont présentées comme des corpuscules de matières différentes ne pourraient être que des agglomérations de particules éthériques de différentes formes qui, peut-être, participent elles-mêmes aux mouvements des tourbillons Maxwell, ou bien le mouvement tourbillonnant des cellules pourrait être remplacé par un mouvement vibratoire ou d'autre sorte. Tous ces cas pourront être représentés en grande simplification par le dessin, si nous admettons, comme je viens de le dire, seulement pour mieux fixer les idées, que les cellules de l'éther remplissent les *interstices entre les molécules* matérielles de tous les corps et y sont dans un mouvement de rotation continuelle, de tourbillonnement. La plupart des autres suppositions restent conformes à l'hypothèse de Maxwell, c'est-à-dire que chaque cellule tourbillonnante est enveloppée par une coquille composée par de tout petits globules éthériques qui se frictionnent à la surface de ces cellules et qui portent, selon Maxwell, le nom de *globules* [ou *cellules de friction*. Maxwell nous propose maintenant de supposer que ces globules de friction représentent les particules de l'électricité elle-même, en supposant que celle-ci soit une matière éthérique. Un mouvement progressif de ces globules représenterait ensuite un courant électrique; un déplacement de ces globules sous tension extraordinaire serait ce que l'on appelle une *charge statique d'électricité*.

Nous nous rappelons encore que, toujours selon Maxwell, il faudrait supposer que ces globules de friction sont, hors leur mouvement rotatif, encore capables d'un mouvement progressif quand ils se trouvent dans un corps qui est conducteur de l'électricité et qu'ils sont comme attachés sur des fils de caoutchouc ou, mieux encore, comme enfoncés dans une gélatine très élastique et pourtant visqueuse, qui néanmoins n'empêcherait pas la facilité de leur rotation quand ils se trouvent dans un corps diélectrique.

Telles sont les hypothèses suffisantes pour arriver à expliquer les phénomènes électriques par des procédés purement mécaniques. Ces mécanismes hypothétiques, imaginés par Maxwell et complétés par Lodge et autres, sont généralement connus, mais, pour les représenter par des images, il faut choisir une certaine

méthode de dessin. M. Weyde a présenté au Congrès un ensemble de dessins et un appareil destinés à reproduire matériellement et mécaniquement les effets d'une force électromotrice, etc.

NOUVEAUX OSCILLOGRAPHES POUR L'INSCRIPTION DES COURBES PÉRIODIQUES DES COURANTS ALTERNATIFS (1);

PAR M. ANDRÉ BLONDEL,
Ingénieur des Ponts et Chaussées,
Professeur d'Électricité à l'École des Ponts et Chaussées, à Paris.

Depuis longtemps, on s'est préoccupé de trouver des méthodes pour inscrire et analyser les variations très rapides des courants électriques. L'étude de ces variations présente en effet aujourd'hui une importance de premier ordre, surtout pour l'étude des courants alternatifs, dans les laboratoires aussi bien que dans l'industrie.

Les méthodes employées pour ces recherches sont de deux espèces : les méthodes *indirectes* ou méthodes par points, et les méthodes *directes*. Les premières, qui ont été seules connues jusqu'à une époque récente, n'ont été l'objet que de peu de perfectionnements depuis quelques années, tandis que les secondes paraissent appelées à être seules employées dans un prochain avenir.

Le desideratum de ces méthodes directes est d'inscrire sans retard et aussi fidèlement que possible les valeurs successives du courant étudié (2).

Les premières tentatives furent faites dans ce sens en réduisant l'inertie des galvanomètres ordinaires, comme le firent d'Arsonval, Arnoux, Éric Gerard; mais il ne s'agissait encore que d'étudier des variations lentes, et ces galvanomètres ne pouvaient analyser des courants rapides. D'autre part, Colley, en 1885, voulant étudier les décharges oscillantes, ne se préoccupa que d'en déter-

(1) Toutes les figures de cette Note ont été prêtées gracieusement par la *Revue générale des Sciences*.

(2) Pour plus de détails sur les méthodes directes autres que les oscillographes, *voir* un Rapport de l'auteur : *Sur l'inscription directe des courants variables*, au Congrès international de Physique en 1900.

miner la période par un galvanomètre analogue à l'électrodynamomètre de Bellati, et ne présentant pas de force directrice; un essai analogue fut fait par M. Nichols à l'aide d'un filet de mercure tombant parcouru par un courant et oscillant dans un champ magnétique. On voit par ces appareils sans force directrice qu'à cette époque on connaissait peu les conditions à remplir. Cependant, Frölich et E. Thomson, en 1887 et 1888, s'en rapprochaient davantage en employant comme instrument de mesure un téléphone muni d'un miroir collé sur la membrane. Mais le téléphone était un bien mauvais type d'instrument de mesure à cause de la complexité de la vibration de sa membrane et des effets d'hystérésis et courants de Foucault dont il est le siège.

Ces différents essais ne furent suivis d'aucune application. Quelques années plus tard, en 1893, l'auteur, partant d'une analyse de la solution théorique (1), trouva une première solution du problème par la création des *oscillographes* (2) qu'on peut définir des galvanomètres à oscillations très rapides par rapport à celles du courant, dépassant 1000 périodes propres par seconde, et susceptibles d'être réglés à l'amortissement critique.

Une seconde solution fut donnée en 1897 par M. Abraham sous le nom de *rhéographe*. Les rhéographes peuvent être définis des galvanomètres à oscillations moins rapides que celles du courant et dans lesquels l'inertie et l'amortissement sont compensés par des effets d'induction électromagnétique.

Enfin, à la même époque, M. F. Braun, reprenant et réalisant pour la première fois une idée indiquée déjà en 1894 par M. Hess, utilisa la déviation des rayons cathodiques par un champ magnétique, pour obtenir dans un tube à rayons cathodiques une image de la courbe du courant traversant un solénoïde voisin du tube. Nous proposerons pour cette étude le nom d'*oscilloradiographie* (3).

---

(1) *Conditions générales que doivent remplir les instruments indicateurs ou enregistreurs* (*Comptes rendus*, t. CXVI, p. 748; 1893).

(2) *Oscillographes, nouveaux appareils pour l'étude des oscillations électriques lentes* (*Comptes rendus*, t. CXVI, p. 502; 1893).

(3) Plus récemment M. Ader et mon regretté camarade Cauro ont employé pour la télégraphie ou la téléphonie des appareils analogues à l'oscillographe bifilaire, mais ne comportant qu'un seul fil relativement long, et sans miroir oscillant dans un champ magnétique puissant. Ces appareils présentent des oscil-

Chacune de ces trois méthodes peut avoir sa raison d'être dans telle ou telle application. Mais on peut reprocher aux deux dernières d'exiger des expérimentateurs habiles et un matériel assez compliqué. L'oscilloradiographie surtout, en dépit de sa perfection théorique, manque de commodité et de précision.

Au contraire, les oscillographes sont faciles à manier, très simples de construction; les derniers types que je vais décrire ici pour la première fois laissent à cet égard les autres très loin en arrière, et, grâce à leur prix de revient relativement bas, ils pourront, j'espère, être bientôt d'un emploi général, de préférence aux anciennes méthodes. Comme on le verra ci-dessous, tous les accessoires ont été étudiés de façon à en rendre l'emploi facile et rapide.

Principes. — La théorie des oscillographes est une généralisation de la belle théorie de la synchronisation de M. Cornu. Pour obtenir le résultat désiré, il faut que les oscillations soient non seulement synchroniques, mais, autant que possible, à chaque instant proportionnelles au courant à mesurer. Si l'on se reporte à l'équation générale des galvanomètres amortis

$$K\frac{d^2\theta}{dt^2} + A\frac{d\theta}{dt} + C\theta = GI,$$

où K est le moment d'inertie, A le coefficient d'amortissement, C le couple de torsion, G la constante galvanométrique, I le courant à étudier, on voit qu'il faut rendre les deux premiers termes négligeables devant le troisième. La discussion se fait aisément en développant I et θ en séries de Fourier.

Supposons ce résultat obtenu; en étalant les déviations dans le sens perpendiculaire, à l'aide des méthodes de composition optique bien connues, dont on parlera plus loin, on traduit le mouvement oscillatoire par une courbe.

D'après la théorie que l'on ne reproduira pas ici, les conditions

---

lations propres bien trop longues pour pouvoir reproduire exactement les courants dont il s'agit; ils peuvent seulement inscrire des signaux ou mesurer des courants alternatifs sinusoïdaux. Il en est de même de l'emploi du téléphone indiqué en 1891 par Wien comme instrument de mesure. Ces appareils, qu'on peut appeler des *oscilloscopes,* ne constituent pas une solution du problème ici considéré.

à remplir sont au nombre de cinq : les deux premières, d'ordre général, applicables à toute espèce d'indicateurs, les autres spéciales aux oscillographes électriques.

1° L'instrument doit avoir une *période d'oscillation propre* très courte par rapport à celle des oscillations électriques. En particulier, pour les courants alternatifs ordinaires, ayant une fréquence comprise entre 40 et 100 périodes par seconde, un bon oscillographe doit vibrer avec une fréquence 50 fois plus grande, c'est-à-dire au moins 5000 périodes par seconde.

2° L'*amortissement* doit être réglé à une valeur aussi voisine que possible de l'apériodicité critique toutes les fois que les oscillations électriques ne sont pas bien continues, ou que les variations brusques ne sont pas supprimées par un artifice de correction. L'auteur a montré la nécessité de réaliser cet amortissement en plongeant les équipages mobiles dans des liquides visqueux, baumes ou huiles (vaseline, ricin), choisis empiriquement et auxquels on donne la température convenable.

Lorsque la fréquence des vibrations propres de l'appareil est très grande, la précision de l'amortissement perd son importance, car il est facile de rétablir le tracé exact sous les dentelures, d'ailleurs toujours vite amorties.

3° La *self-induction* propre doit être assez faible pour ne pas altérer la loi de variation du courant mesuré. On verra plus loin comment on peut la compenser.

4° Les phénomènes d'*hystérésis* et les *courants de Foucault* dans l'appareil doivent être négligeables.

5° La *sensibilité* doit être suffisante, ce qui entraîne l'emploi de parties mobiles excessivement petites.

Les conditions 1°, 3° et 5°, plus ou moins opposées entre elles, sont plus difficiles à concilier.

L'auteur a étudié et indiqué dès le début (1893) trois types satisfaisant, avec des sensibilités diverses, à ces conditions : l'oscillographe bifilaire, l'oscillographe à barreau mobile et l'oscillographe à plaque vibrante. Tous ceux qui ont été construits depuis rentrent dans ces types. Mais dans ce qui suit, nous ne considérerons que deux catégories, car mon dernier type d'oscillographe à fer doux est une combinaison du barreau et de la plaque vibrante en un seul organe

Oscillographe bifilaire. — C'était en 1893 une forme complètement nouvelle du galvanomètre (*fig.* 1) dérivant indirectement d'un galvanomètre à cadre mobile, l'inertie du cadre et la sensibilité étant toutes deux proportionnelles au nombre de spires; par conséquent, il n'y a pas d'intérêt à en avoir un nombre supérieur à deux; l'auteur en a conclu que la plus simple des solutions consistait à supprimer le cadre et à le remplacer par un simple *bifilaire* formé de deux fils parallèles très rapprochés traversés par le courant étudié et portant un miroir collé en leur milieu; ce bifilaire était placé entre deux pôles d'électro-aimant allongés et aussi rapprochés que possible, comme le montre la *fig.* 1, et

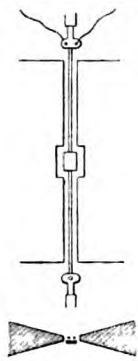


Fig. 1. — Schéma du premier oscillographe bifilaire de l'auteur, construit en 1893.

donnant au champ magnétique la plus grande intensité possible.

Les grands avantages de ce dispositif sont la simplicité de la suspension, l'absence de toute vibration parasite, la très faible self-induction et la grande intensité réalisable pour le champ magnétique qui donne beaucoup de sensibilité. Les inconvénients sont la nécessité de ce champ puissant, la finesse des fils nécessaires et la difficulté de faire tenir le miroir sur le bifilaire d'une façon durable.

Divers perfectionnements ont été apportés à l'oscillographe bifilaire dans ces dernières années. Les deux fils de cuivre furent remplacés en 1897, par M. Duddell, par deux bandes de bronze phosphoreux fortement tendues, ce qui permit d'accroître le nombre de vibrations jusqu'à 10 000 par seconde en même temps que la sensibilité; mais, faute d'une étude théorique suffisante,

les meilleures conditions n'étaient pas encore réalisées. L'auteur croit avoir résolu plus complètement ce problème par l'emploi raisonné de bandes d'aluminium de section convenable et l'application à l'électro-aimant inducteur de principes de construction rationnels, inspirés des études de Ewing et de Weiss. La sensibilité a été ainsi triplée.

Les pôles coniques de Ewing sont utilisés en remplaçant l'isthme par de petites pièces polaires en biseau (*fig.* 2), entre lesquelles

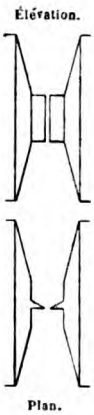


Fig. 2. — Disposition des pièces polaires et des pièces de concentration en fer doux des oscillographes bifilaires.

on ménage un petit entrefer de 0,6 mm à 1 mm; la *fig.* 3 indique en gros le mode de construction pour un oscillographe double.

Dans ce cas, il y a deux entrefers semblables séparés par une petite pièce de fer, et chacun comprend un bifilaire. L'ensemble n'occupe pas plus de 20 mm de largeur, et grâce à la forme conique des pôles adjacents, le champ est très concentré et atteint un maximum élevé dans les entrefers, même avec un électro-aimant de 30 kg seulement, dont les diverses parties sont parfaitement proportionnées. On fait également des oscillographes triples avec un électro de 55 kg. Le montage et l'emploi de l'appareil sont grandement facilités par le dispositif que j'ai adopté pour les bifilaires et les pièces polaires de l'électro; celles-ci forment, avec des entretoises en bronze qui en maintiennent l'écartement et une

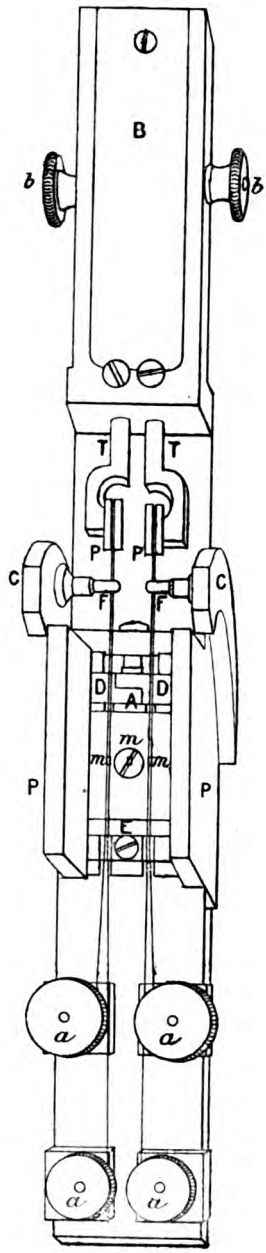


Fig. 3. — Partie principale de l'oscillographe bifilaire de 1900.

a, *a*, bornes-attaches des bandes — P, P, pièces polaires en fer, qui s'appliquent contre les pôles libres de l'électro-aimant. — *c*, *c*, crochets-supports. — F. F, bifilaires, en bandes d'aluminium ou de bronze. — *m*, *m*, miroirs collés à cheval sur les bandes, et miroir de repère collé sur une tête de vis. — E, appui inférieur des bandes en ivoire. — D, D, appuis supérieurs en ivoire. — A, pivot commun des appuis supérieurs (deux vis placées derrière l'appareil permettent d'obliquer l'un ou l'autre de ces appuis en les faisant tourner autour du pivot central A). — *p*, *p*, poulies tendeuses. — T, T, tiges tendues par des ressorts spiraux contenus dans la boîte B. — *b*, *b*, attaches mobiles des extrémités supérieures des ressorts tendeurs.

lentille plan convexe fixée sur le devant, une boîte amovible qui porte toute la partie délicate de l'appareil, et dans laquelle on introduit de l'huile et un thermomètre. Chacun des bifilaires est tendu *séparément* sur deux chevalets d'ivoire, celui du bas fixe, celui du haut orientable par une vis tangente. Les attaches des brins des bifilaires se font sur une plaque d'ébonite fixée en dessous de la boîte; leur tension est produite pour chacun à l'aide d'une petite poulie embrassée par le bifilaire au-dessus du chevalet supérieur. Chaque poulie est tendue individuellement par un ressort étalonné et réglable. On amène les images en concordance avec celles d'un miroir fixe à l'aide des vis tangentes. Le montage et le remplacement des bifilaires se fait avec la plus grande facilité, grâce à des dispositifs étudiés en vue de rendre cette manœuvre commode. En outre, chaque appareil peut être muni de plusieurs boîtes interchangeables établies suivant des données différentes, ce qui permet d'utiliser l'instrument pour des applications variées exigeant plus ou moins de sensibilité, plus ou moins de lumière, etc.

Avec des bifilaires très courts (10 à 15 mm) en aluminium, et des miroirs très petits collés à la gomme laque, on atteint des nombres de vibrations de 10 000 à 15 000 par seconde et des sensibilités de 600 à 800 mm par ampère à 1 m de distance. On obtient ainsi de très bons appareils de laboratoire. Pour certains usages, on peut quadrupler la sensibilité en se contentant de 5 à 6000 vibrations par seconde.

L'équipage bifilaire de ces appareils peut être considéré (et c'est là son grand avantage) comme un appareil à *vibrations tournantes,* étant donné que les fils ou bandes sont très rapprochés et parfaitement solidarisés en leur milieu par le miroir, de manière que toute torsion de celui-ci imprime aux deux brins, non seulement des déplacements transversaux, mais des torsions. Or, on sait, d'après les travaux de Saint-Venant, que les vibrations tournantes d'une tige prismatique peuvent avoir une fréquence beaucoup plus élevée que ses vibrations transversales; sans qu'il soit nécessaire d'appliquer au bifilaire des tensions très grandes, on peut donc accroître la fréquence propre en augmentant le nombre des vibrations tournantes des deux brins.

On démontre que le nombre de vibrations est la racine carrée de la somme des carrés du nombre des vibrations dues à l'élasticité

de torsion et du nombre des vibrations transversales ; on peut donc le faire varier dans certaines limites en tendant plus ou moins le ressort auquel est attachée la poulie égalisatrice. Pour réduire la période de vibration propre, sans accroître trop la tension par unité de section $\frac{T}{\sigma}$, il convient d'employer des bandes assez épaisses relativement à leur largeur (l'idéal serait des fils carrés ou ronds très rapprochés), et de réduire au minimum le rapport $\frac{\varpi}{E}$ du poids spécifique au coefficient d'élasticité par le choix convenable du métal.

La discussion de la sensibilité, pour un nombre de vibrations donné, conduit aux mêmes desiderata.

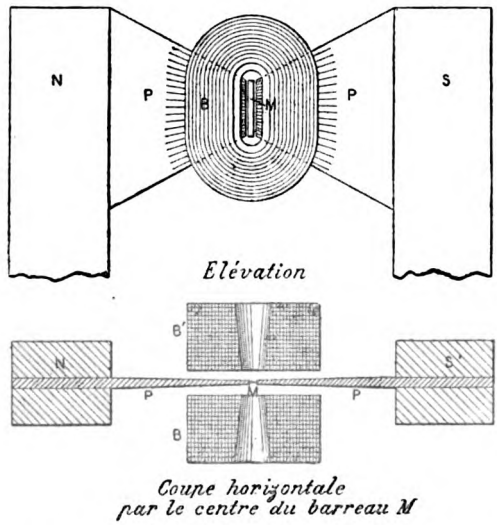


Fig. 4. — Schéma du premier oscillographe à fer doux de l'auteur, construit en 1893.

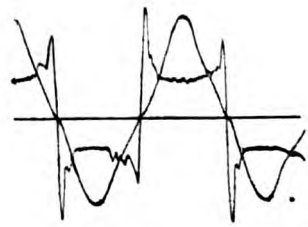
N, S, pôles d'un aimant ou électro-aimant. — P, P, pièces polaires plates feuilletées. — M, petit barreau mobile en fer doux, doublé d'un miroir et pivoté entre pointes, ou collé sur un fil métallique.

L'auteur a pu, grâce au précieux concours de M. Charpentier-Page, satisfaire à ces conditions en employant des bifilaires d'aluminium très élastiques, en fils plats et ronds de très petites sections,

qui donnent de très bons résultats, comme le montrent les chiffres cités plus haut. Le bronze phosphoreux ou siliceux donne aussi de suffisants résultats et il est plus facile à préparer.

Oscillographe a fer doux. — Dans l'appareil primitif, dont la *fig.* 4 donne le schéma, un très petit barreau de fer doux portant un miroir était suspendu dans un champ magnétique très intense, produit par un aimant ou mieux par un électro-aimant puissant; le courant à étudier passait dans deux bobines placées de part et d'autre des pièces polaires (très aplaties pour laisser la place nécessaire), et produisait un champ oscillatoire perpendiculaire au champ directeur. Pour réduire le moment d'inertie, le barreau était plus haut que large. Pour éviter les courants de Foucault, les pièces polaires étaient faites en tôles assemblées feuilletées horizontalement.

Par suite des attractions auxquelles le barreau mobile était soumis dans le champ intense, on était obligé de le maintenir mécaniquement par des pivots ou de le fixer à une petite bande métallique tendue verticalement; la fréquence était au début seulement de 1000 à 1500 périodes par seconde.



ig. . — Fac-similé de courbes périodiques d'un arc alternatif (crayons homogènes, circuit inductif) obtenues par l'oscillographe double de 1897.

En 1897, l'auteur a présenté à l'Exposition de la Société de Physique un appareil de ce genre déjà plus perfectionné, construit avec le concours de MM. Jigouzo et Pellin, permettant la vision directe des courbes et donnant 5000 à 6000 vibrations propres par seconde, ce qui assurait une assez grande précision pour l'étude des courants industriels.

L'appareil était double et donnait à la fois (ce qu'on n'avait pas

réalisé encore à cette époque) les courbes de l'intensité de courant et de la différence de potentiel, dans leurs phases relatives, sur un même écran ou sur une même plaque photographique, qui recevait, en outre, une image de l'axe des temps, comme le montre la *fig.* 5. Chacun des oscillographes était analogue à celui de la *fig.* 2 et avait son champ produit par un électro-aimant ([1]). Le barreau réduit à 1 mm de largeur était contenu avec ses pivots dans une petite boîte à huile fermée par une lentille (*fig.* 6).

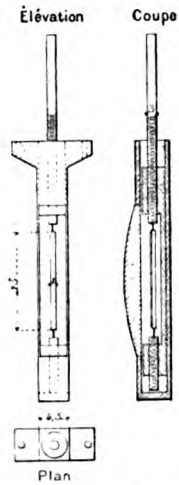


Fig. 6. — Détail de la boîte à huile des oscillographes de 1897, contenant le barreau de fer doux entre pivots.

Malgré les grands progrès réalisés, l'oscillographe à barreau mobile ne donnait que des fréquences encore trop faibles à mon gré, et l'emploi de pivots, malgré leur perfection, était sujet à quelques inconvénients.

En reprenant, pour le supprimer, le montage du barreau sur une bande métallique, j'ai été amené par une étude théorique à prendre comme barreau la bande elle-même, en la faisant en fer doux. La combinaison ainsi réalisée, qui m'a donné des résultats inespérés, peut être appelée *oscillographe à bande vibrante.*

Oscillographe a bande vibrante. — Ce nouveau dispositif con-

([1]) Pour plus de détails, voir *L'Industrie électrique,* 10 avril 1899.

siste simplement dans l'emploi d'une bande plate très mince et très étroite (0,2 à 0,3 millimètre de largeur sur quelques centièmes d'épaisseur) tendue verticalement dans le champ magnétique de la *fig.* 2, entre deux chevalets distants de 10 mm à 30 mm, et portant un très petit miroir en son milieu. Pour la commodité du montage et des réglages, cette bande est renfermée dans une boîte à huile (*fig.* 7) munie d'une lentille analogue à celle de la *fig.* 6, mais plus compliquée, car elle est munie d'un tendeur et susceptible d'orientation et de déplacement vertical; de cette manière, le fer doux n'a plus besoin de pivots ni de fil de suspension.

Chaque élément horizontal de la bande se comporte comme un petit aimant, et les déviations produites par l'effet des bobines se cumulent des extrémités au centre de la bande, ce qui augmente beaucoup la sensibilité; les déviations totales indiquées par le miroir sont proportionnelles au courant.

Grâce aux propriétés des vibrations tournantes, beaucoup plus rapides que les vibrations transversales, cet équipage mobile tend à présenter une périodicité très élevée, qu'augmentent encore les influences de la tension et du champ magnétique. On démontre, en effet, que le nombre de vibrations propres est la racine carrée de la somme des carrés des nombres de vibrations dues respectivement à l'élasticité de torsion, à la tension (nombre des vibrations transversales) et enfin au champ magnétique.

L'auteur a pu obtenir depuis un an par ce dispositif, avec l'habile et persévérant concours de son assistant M. Dobkévitch, aujourd'hui constructeur, des fréquences propres de 40 à 50 000 périodes par seconde [1] avec une sensibilité convenable. Cette sensibilité peut être grandement accrue si l'on se contente de 10 000 à 20 000 périodes; elle atteint alors aisément 100 mm par ampère à 1 m et même davantage, si le fer employé est très pur et bien recuit.

Il semble que ce procédé donne le maximum d'avantages dans l'emploi du fer doux, parce qu'il permet d'atteindre des intensités d'aimantation très élevées de la bande, même avec les champs rlativement faibles produits par un aimant permanent. Ces champs

---

[1] L'auteur a été également fort utilement assisté par MM. Duris, Tchernosvitoff et Farmer. Les bandes de fer doux ont été préparées non sans difficultés par MM. Gaiffe et Pellin, constructeurs.

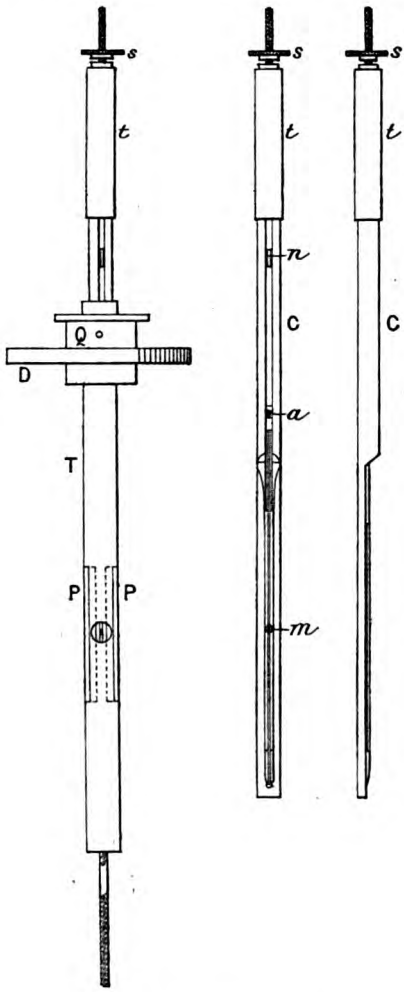


Fig. 7. — Boîte à huile du nouvel oscillographe à bande de fer vibrante.

T, tube à huile en ivoire. — P, P, pièces de concentration du champ magnétique, incrustées dans l'ivoire (ou fixées au support); en avant se trouve une fenêtre munie d'une lentille L, également incrustée dans la paroi. — Q, anneau de cuivre muni d'une vis tangente D. — C, détail du chevalet-support en ivoire contenu dans la boîte à huile. — *m*, miroir collé sur la bande. — *a*, attache de la bande à un petit chariot qui coulisse dans la rainure rectangulaire C. — *n*, tige d'attache de ce chariot. — *t*, petit cylindre en cuivre, contenant un ressort spiral autour de la tige. — *s*, bouton moleté servant d'écrou à la partie supérieure de la tige *n*; en tournant ce bouton, on tend plus ou moins le ressort qui soulève la tige, et, par suite, on tend plus ou moins la bande de fer doux fixée en *a*.

suffisent pour donner 30 000 à 40 000 vibrations par seconde avec un aimant un peu fort, 20 000 à 25 000 avec un petit aimant de quelques kilogrammes. Grâce à sa minceur extrême, la bande atteint aisément la saturation.

L'utilité d'une aimantation saturée est très visible si l'on trace, pour un oscillographe à électro-aimant, des courbes du genre de celles de la *fig.* 8 où l'on a porté en abscisses les ampères-tours

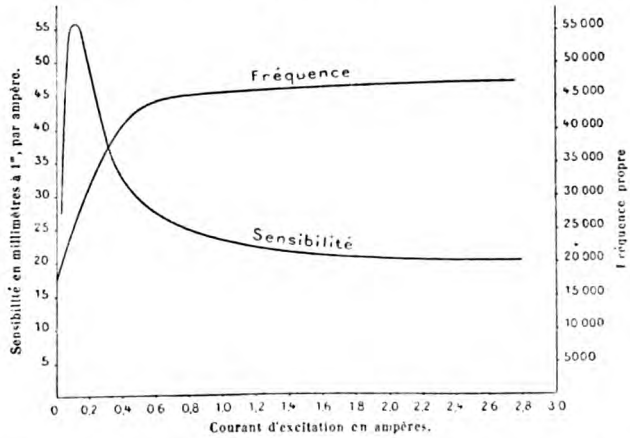


Fig. 8. — Spécimen d'une courbe de relation entre les intensités du champ magnétique, la sensibilité et la fréquence.

Abscisses : courants d'excitation du champ (électro-aimant) en ampères. — Ordonnées de droite : nombres de vibrations doubles par seconde. — Ordonnées de gauche : déviations à 1 m en millimètres par ampère (avec de très petites bobines de 6 ohms de résistance).

magnétisants et en ordonnées les nombres de vibrations doubles par seconde et les sensibilités (en millimètres par ampère sur une échelle placée à 1 m de distance). On voit que la sensibilité va d'abord en croissant, grâce à l'aimantation croissante de la bande, puis qu'elle décroît à partir du moment où cette aimantation augmente moins vite que le champ; au contraire le nombre de vibrations va toujours en croissant, d'abord très vite, puis plus lentement par suite de la saturation de la bande et aussi de la saturation du noyau de l'électro-aimant. Il y a une très grande différence entre les résultats suivant que le fer employé est plus ou moins parfaitement doux, aussi bien pour le nombre de périodes que pour la sensibilité.

La sensibilité se règle d'ailleurs dans de larges limites en shuntant magnétiquement plus ou moins l'aimant par un cavalier de fer doux qui permet d'obtenir toute une gamme de fréquences différentes.

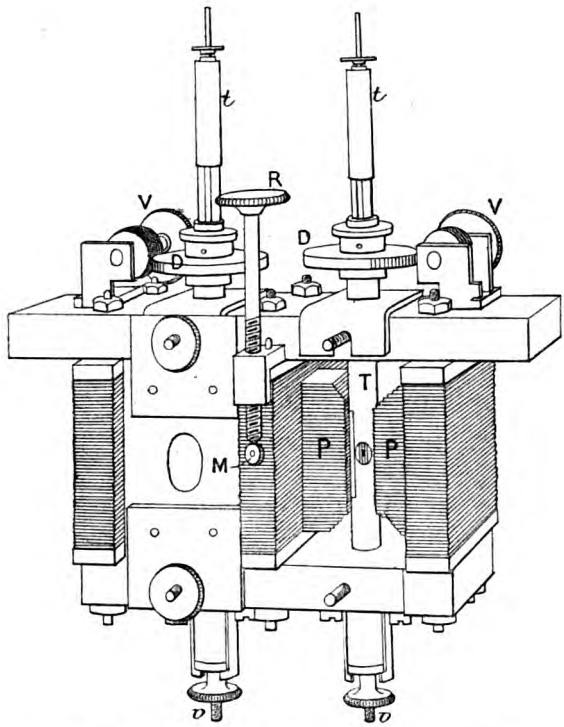


Fig. 9. — Vue des pièces rapportées entre les pôles de l'aimant.

P, P, pièces polaires feuilletées en tôle. — T, tubes à huile contenant les équipages mobiles. — *v*, *v*, vis-écrous moletées pour élever ou abaisser les tubes. — V, vis sans fin attaquant les roues D pour orienter les tubes. — M, miroir destiné à donner le trait de repère. — R, bouton pour orienter ce miroir.

Il va sans dire que, la bande étant très petite, il doit en être de même des miroirs; ceux-ci ont pu, grâce aux efforts de MM. Pellin, Werlein et Dobkévitch, être réduits à 0,2 mm de largeur sur 0,05 mm à 0,1 mm d'épaisseur et 0,5 mm de hauteur. Ils sont en verre ou en mica, argentés par le procédé Martin ou Foucault; ils sont collés à la gomme laque sur les bandes avant le montage de celles-ci; quant à ce montage, il se fait sur un petit chevalet

d'ivoire qu'on introduit ensuite dans la boîte à huile. La bande est ainsi préservée de la rouille et mise à l'abri de toute détérioration.

Grâce à ce dispositif des boîtes à huile, l'oscillographe à fer doux réalise le même avantage d'interchangeabilité que je me suis déjà efforcé d'obtenir pour l'appareil bifilaire. Avec une série de chevalets ou de boîtes à huile on peut réaliser des fréquences ou des sensibilités variées; en employant par exemple des bandes plus larges avec de plus gros miroirs on transforme l'appareil de laboratoire en appareil de démonstration pour projections; celles-ci se font sur un écran blanc de 1 m² environ avec des bandes de 0,8 mm à 1 mm de largeur.

Enfin, grâce à l'emplacement très restreint occupé par les boîtes à huile et les bobines qui ont moins de 30 mm de largeur, et aux faibles champs nécessaires, il est facile de loger côte à côte dans un même circuit magnétique deux et même trois oscillographes semblables et indépendants. Il suffit, pour éviter complètement toute influence réciproque, de les séparer par des cloisons de tôles feuilletées en donnant aux pièces polaires intermédiaires la forme d'une croix comme le montre la *fig.* 9. La convergence des images s'obtient par simple orientation des boîtes à huile, comme on le verra plus loin avec plus de détails.

Mode d'observation et d'enregistrement des courbes. — Les oscillographes, ainsi que les autres appareils d'étude directe, donnent un spot lumineux dont les déviations sont proportionnelles à l'intensité ou à la tension du courant étudié; pour transformer ces déviations en courbes, il faut imprimer en même temps au spot un déplacement perpendiculaire au premier et proportionnel au temps. De nombreux dispositifs mécaniques ou optiques ont été imaginés dans ce but pour l'emploi des oscillographes ou des rhéographes : glace tombant, tambour tournant, miroir tournant, miroir oscillant, etc. Tous sont applicables aux oscillographes, mais l'auteur s'est attaché plus particulièrement à permettre la vision continue des courbes à l'œil nu aussi bien que leur photographie.

Il a reconnu que le dispositif le plus satisfaisant pour obtenir ce résultat est celui du miroir oscillant imaginé par M. Abraham

en 1896. Les rayons lumineux provenant des oscillographes sont réfléchis environ à 45° sur un miroir mobile autour d'un axe parallèle au plan des déviations de ces rayons.

Son mouvement oscillant est produit par une came qui lui donne un mouvement d'aller lent proportionnel au temps, puis un mouvement de retour brusque aidé par un ressort. Le mouvement de la came est entretenu soit par un pendule, soit préférablement par un moteur synchrone.

L'auteur a réalisé pour cette application un petit moteur synchrone à 6 pôles, extrêmement simple, sans frotteur ni balais. L'induit est fixe, l'inducteur est un aimant tournant dont l'axe porte la came et une vis sans fin que commande une petite manivelle. Il suffit de donner à la main quelques tours de cette manivelle pour lancer le moteur à sa vitesse et le synchroniser. La came perpendiculaire à l'arbre porte un canal creux, tracé suivant un profil calculé pour assurer le mouvement uniforme, et dans lequel est guidé un galet d'acier ou d'agate fixé à l'extrémité d'un levier passant par l'axe du miroir. Cet axe est défini par deux pointes d'acier fixées à une plaque d'aluminium sur laquelle est collé le miroir.

Pendant la période de retour du miroir en arrière, les rayons lumineux provenant du projecteur sont obturés par un petit disque commandé par le moteur.

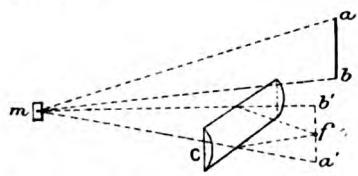


Fig. 10. — Schéma de l'artifice optique de Boys.

ab, fente lumineuse verticale. — *m*, petit miroir d'oscillographe. — *c*, lentille cylindrique à génératrices horizontales. — *a' b'*, image théorique de la fente *ab*. — *f*, point suivant lequel cette image est concentrée par la lentille C.

Dans sa position moyenne, le miroir est environ à 45° sur l'horizontale de façon à renvoyer verticalement sur son écran horizontal les rayons qu'il reçoit des oscillographes. Devant ce miroir, du côté des oscillographes, est placée une lentille de concentration à courbure cylindrique.

Le professeur Boys a eu, en effet, l'ingénieuse idée, pour diminuer la surface du miroir des oscillographes, de concentrer verticalement les rayons qui en proviennent par une lentille cylindrique à axe horizontal C (*fig.* 10), qui permet leur libre déviation dans le sens horizontal; la source de lumière est une fente verticale éclairée par un projecteur, dont les miroirs plans des oscillographes précédés d'une lentille plan convexe sphérique donnent en S des images conjuguées; la lentille C réduit chacune de ces droites lumineuses à un point rectangulaire ayant pour hauteur celle du miroir correspondant, réduite dans le rapport des distances $\frac{Cf}{Cm}$; l'éclairement de l'image se trouve accru en raison inverse de sa hauteur, de sorte qu'en appelant l et l' les distances du point image respectivement au miroir de l'oscillographe et à l'axe optique de la lentille cylindrique, H la hauteur de l'image $a'b'$ de la fente, et b la largeur du miroir, l'expression de e est

$$e = \frac{(1-a)(1-a')bHi}{ll'} \times \beta,$$

en appelant :

a le coefficient d'absorption totale des rayons dans leur trajet à travers le projecteur et l'oscillographe;

s la surface éclairée du miroir;

l la distance de celui-ci au spot;

i l'éclat intrinsèque du cratère de l'arc;

β le coefficient de diffusion du verre dépoli (qu'on peut remplacer par l'unité, si l'on veut regarder directement les images aériennes à l'aide d'un oculaire micrométrique);

a' le coefficient d'absorption de la lentille cylindrique.

On conçoit combien est précieux ce moyen qui permet d'augmenter l'éclat, non par la dimension du miroir mobile, mais par celle d'une simple fente fixe; il résout complètement la question de l'éclairement des oscillographes, quelque petite que soit leur partie vibrante. En outre il suffit que les miroirs de plusieurs équipages voisins employés simultanément soient placés sur une même horizontale pour que leurs images, fournies par la lentille C à génératrices horizontales, soient également toutes sur une même horizontale, alors même que ces miroirs ne seraient pas bien verticaux.

Pour tirer parti de cette dernière propriété, j'ai donné aux boîtes à huile des oscillographes à fer doux, non seulement un mouvement d'orientation, mais un déplacement vertical par vis de rappel.

Caisses « kodak » pour l'emploi des oscillographes (*fig.* 11; 12). — Pour éviter toutes les complications d'un montage lors de chaque expérience et rendre l'appareil portatif, tous les organes en sont réunis et fixés invariablement dans une solide caisse en bois de 0,8 m de longueur. Cette caisse, à laquelle je donne le nom de *Kodak*, par analogie avec les appareils photographiques de Eastman, forme chambre noire. A l'une de ses extrémités est placé l'oscillographe, à l'autre le synchronoscope (c'est-à-dire l'ensemble du miroir oscillant, de la lentille et du moteur synchrone) et au-dessus, dans la paroi, l'objectif de protection cylindrique, avec diaphragme percé d'une ou plusieurs fentes verticales destinées à éclairer le ou les équipages mobiles et le miroir de repère.

De petites portes latérales permettent de régler l'oscillographe et de mettre en marche le moteur.

En outre la caisse porte un couvercle amovible qui permet de découvrir tout l'appareil. C'est sur ce couvercle qu'est fixé le châssis qui reçoit l'écran en verre dépoli pour voir et tracer les courbes; cet écran peut être remplacé par un châssis photographique. Un soufflet de chambre noire est ajouté quand on le juge nécessaire pour changer la distance focale.

Comme source de lumière, on emploie le plus simplement une lampe à incandescence placée au foyer de la lentille de projection, ou une flamme d'acétylène. Dans ces conditions on peut photographier avec quelques secondes de pose en employant des lampes à incandescence spéciales.

Pour les projections et pour les photographies instantanées, on emploie l'arc électrique; un modèle de lampe à arc à main étudié dans ce but par l'auteur et construit par M. Vassia s'accroche contre la paroi de la caisse dans une position invariable et se manœuvre très facilement.

Les *fig.* 13 et 14 indiquent la marche des rayons lumineux pour la vision directe et la projection des courbes.

Enfin, pour faciliter l'emploi de l'appareil, on y a ajouté un petit tableau de distribution, dans un placard latéral, qui s'ouvre

en dehors. Ce tableau contient ampèremètre, voltmètre, interrup-

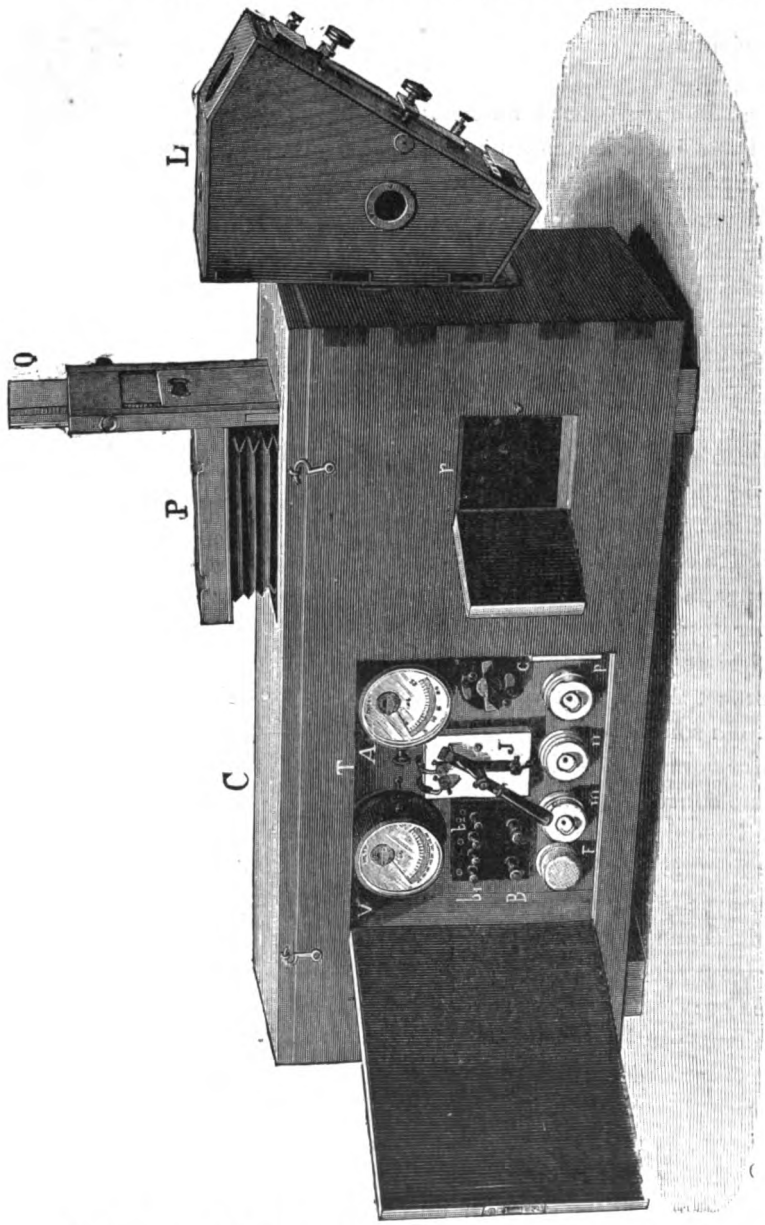


Fig. 11. — Vue d'ensemble extérieure de l'oscillographe « Kodak » double.

C, couvercle de la caisse, auquel est fixée la chambre noire à soufflet P, dont la queue peut se rabattre dans le plan du couvercle. — L, lampe à arc. — r, ouverture pour la mise en marche du synchronoscope. — T, tableau de distribution, contenu dans un placard. — V, voltmètre. — A, ampèremètre. — B, bornes, et J, commutateur du courant principal, passant par l'ampèregraphe. — C, commutateur pour mise en court-circuit de l'ampère-mètre. — b_1, bornes du circuit voltgraphe. — b_2, bornes du circuit du synchronoscope. — F, fusibles du circuit voltgraphe et du synchronoscope. — m, n, p, interrupteurs des circuits du voltgraphe, du voltmètre et du synchronoscope.

teurs, fusibles et bornes d'attache des conducteurs; de sorte qu'il

n'y a jamais aucun montage de fils à faire. Dans le même but, les

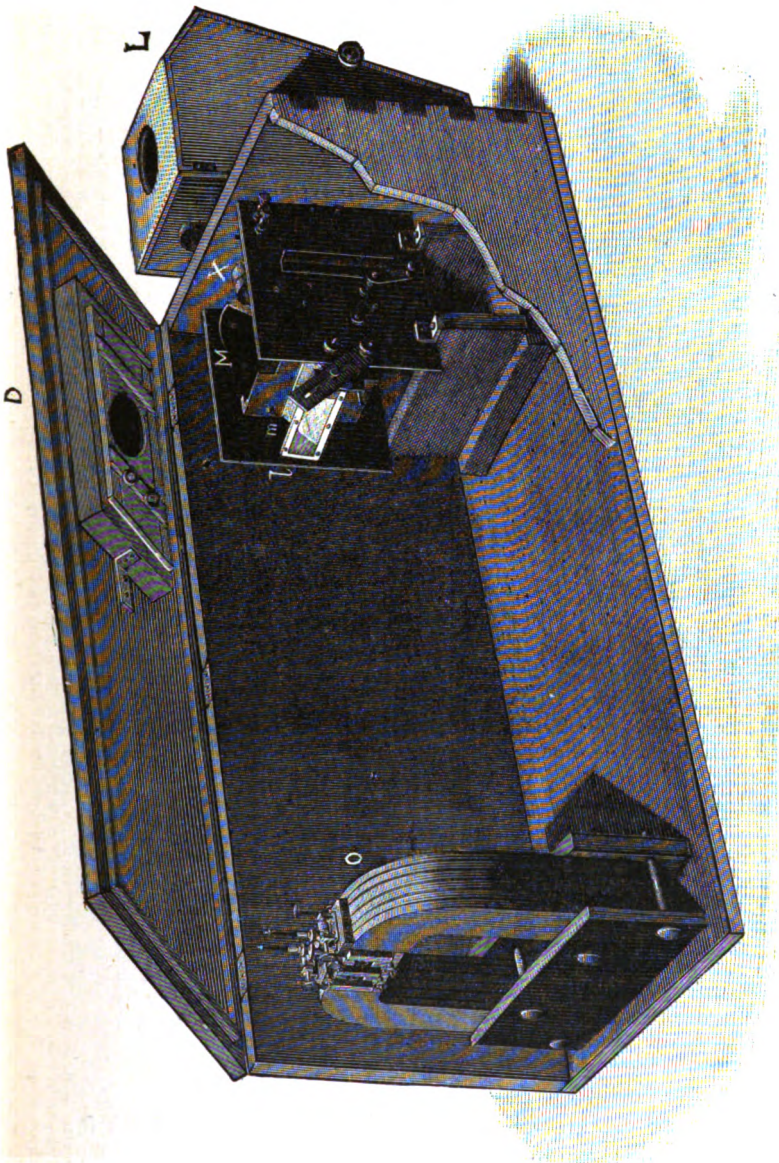


Fig. 12. — Vue intérieure du même appareil « Kodak » double.

O, aimant à lames, portant à sa partie supérieure les deux oscillographes jumeaux. — D, chambre noire à soufflet. — *l*, lentille cylindrique. — *m*, miroir oscillant du synchronoscope. — M, disque obturateur monté sur l'arbre et tournant devant l'objectif. — X, objectif à lentille cylindrique fixé dans la paroi de la caisse et muni d'un diaphragme à trois fentes éclairant respectivement les miroirs des deux équipages mobiles et le miroir de repère.

rhéostats ou shunts nécessaires avec les oscillographes employés

comme voltmètre ou comme ampèremètre sont eux-mêmes installés à poste fixe dans la boîte.

L'ensemble est ainsi portatif et indéréglable.

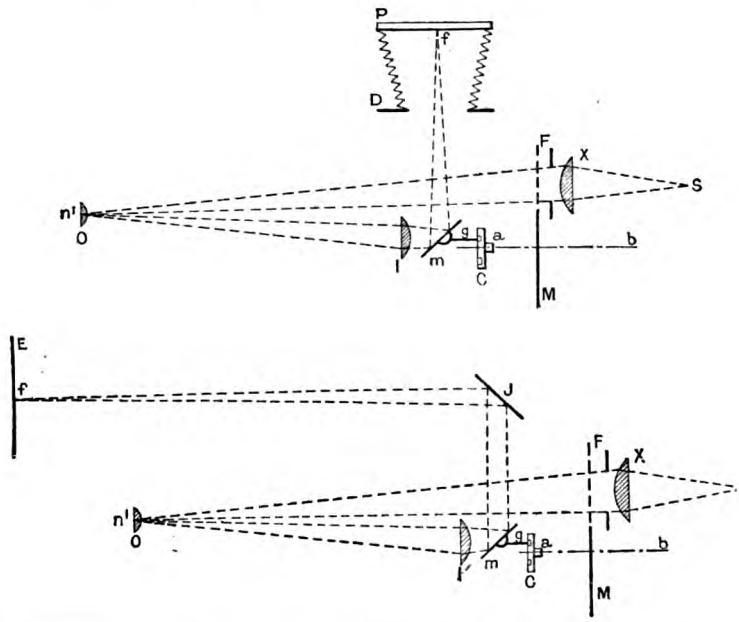


Fig. 13 et 14. — Schémas de la marche des rayons lumineux dans l'oscillographe « Kodak », soit pour le tracé et la photographie des courbes (*fig.* 13), soit pour leur projection dans un cours (*fig.* 14).

S, source de lumière (arc électrique). — X, objectif ou condenseur, à lentille cylindrique horizontale. — F, diaphragme percé de fentes verticales éclairant chaque petit miroir *n*. — N, miroir plan d'un équipage mobile. — O, petite lentille plan convexe de la boîte à huile. — *l*, lentille cylindrique horizontale pour la concentration des rayons réfléchis. — *m*, miroir oscillant à axe horizontal (perpendiculaire au tableau) commandé par un levier *g*. — *ab*, arbre moteur. — C, came calée sur cet arbre et agissant sur l'extrémité du levier *g*, et calculée de façon que le déplacement du point lumineux *f* sur l'écran P soit proportionnel au temps. — M, disque calé sur l'arbre *ab*, et échancré de façon à n'obturer les rayons que pendant le retour du point *f*. — J, miroir qui remplace la chambre noire pour les projections. — *l'*, lentille cylindrique à long foyer. — E, écran de projection.

Il convient de remarquer qu'en éclairant l'oscillographe à fer doux par incandescence, on n'a plus besoin d'aucun courant continu, condition extrêmement importante pour relever des courbes sur les secteurs ou dans les usines à courants alternatifs.

Comparaison et choix entre les divers types. — L'oscillographe à fer doux est, grâce à sa construction robuste, l'instrument normal qu'il convient d'employer dans les usages industriels. Les perfectionnements récents ont permis de lui donner des qualités exceptionnelles de précision et de sensibilité qu'on n'avait pu obtenir jusqu'ici. Il n'exige que peu de précaution et peut être mis entre des mains peu exercées. Son prix a été très réduit, surtout pour le modèle de demi-précision.

Dans les laboratoires aussi, il peut être employé avantageusement dans toutes les recherches où l'on n'a pas à analyser de courants inférieurs à 0,1 ampère et où l'on ne craint pas dans les circuits de voltmètre la présence d'un peu de self-induction provenant des bobines de l'oscillographe. Celle-ci peut être d'ailleurs compensée presque complètement, comme on le verra ci-dessous, par l'addition d'un condensateur de capacité appropriée.

Cet oscillographe présente l'avantage d'une fréquence d'oscillation propre extrêmement élevée qui assure l'inscription exacte de phénomènes électriques oscillatoires atteignant jusqu'à 1000 oscillations par seconde, et qui, pour les courants alternatifs ordinaires, dispense de tout réglage précis de l'amortissement.

Le type bifilaire présente de plus grandes sensibilités, tout en réalisant des fréquences de plus de 10 000 périodes complètes par seconde. Il convient aux recherches de laboratoires, pour lesquelles on désire éviter toute self-induction ou étudier des courants d'intensité inférieure à 0,1 ampère.

Mais il exige un électro-aimant puissant qui rend l'appareil beaucoup moins portatif que le précédent. Il est aussi plus délicat de construction et d'emploi, et l'on a à craindre de brûler le bifilaire par un court-circuit. Il doit être enfin entretenu à une température constante, malgré l'échauffement des bandes, produit par le courant, sous peine de voir varier le coefficient d'élasticité des bandes, et par suite la constante de l'appareil.

L'oscillographe bifilaire doit donc être réservé aux travaux de laboratoires spéciaux dont on vient de parler, et aux opérateurs exercés.

En outre il ne peut être employé que si l'on a du courant continu à sa disposition.

Comme on l'a dit, dans chacune des deux catégories précé-

dentes, les oscillographes sont construits à volonté simples, doubles ou triples.

Les oscillographes simples ne comprenant qu'un seul équipage mobile peuvent cependant enregistrer à volonté un courant ou une force électromotrice; il suffit de munir les oscillographes à fer doux de deux paires de bobines interchangeables, les unes à fil fin, les autres à gros fil. Quant à l'oscillographe bifilaire, toujours à fil fin, il joue le rôle de voltmètre ou d'ampèremètre, suivant qu'on le monte en série avec une grande résistance ou en dérivation sur une faible résistance.

Le type simple, suffisant pour des études d'ateliers, doit être remplacé par le type double quand on veut inscrire à la fois, et non successivement, la tension et le courant pour en mesurer le décalage; c'est le cas ordinaire de la pratique.

Les oscillographes triples trouvent enfin leur application spéciale dans les recherches de laboratoire, quand on veut inscrire à la fois le courant consommé, la tension aux bornes et une autre variable corrélative, telle que la force électromotrice produisant le courant, ou les variations d'un courant soumis à des réactions, etc.

Limite d'emploi des oscillographes. — Les oscillographes sont plus simples que toutes les méthodes indirectes d'autrefois; ils donnent l'aspect instantané du phénomène et non un aspect moyen, et se prêtent à une inscription facile des courbes. Ils peuvent jouer le même rôle, pour l'étude des courants alternatifs, que l'indicateur de Watt pour les machines à vapeur, et leur précision est bien plus grande.

Leur emploi n'est limité que par la rapidité des variations du courant. Il ne faut guère dépasser des fréquences supérieures au $\frac{1}{50}$ de leur fréquence propre. Leur exactitude dépend de l'inertie, de l'amortissement, et de la self-induction. En ce qui concerne les deux premiers facteurs, il suffit de savoir qu'avec l'amortissement critique, la précision dans le cas usuel le plus défavorable (inscription de rectangles) est sensiblement égale au rapport de la période de l'instrument à celle du courant alternatif étudié.

La self-induction de l'instrument L est pratiquement négligeable avec les oscillographes bifilaires et avec les oscillographes à fer doux à gros fil, jouant le rôle d'ampèremètres; elle n'entre en

ligne de compte que dans les oscillographes-voltmètres à fer doux. Or, il est facile de voir qu'elle équivaut alors à un simple accroissement d'amortissement. En effet, l'équation du galvanomètre-voltgraphe peut s'écrire sensiblement (au deuxième ordre près) :

$$K\frac{d^2\theta}{dt^2}+\left(A+\frac{CL}{R+R'}\right)\frac{d\theta}{dt}+C\theta=\frac{GU}{R+R'},$$

K, A, C conservant les mêmes significations que plus haut, et U, R et R′ désignant respectivement la tension aux bornes, la résistance du voltgraphe et la résistance supplémentaire du circuit en série avec lui. On peut donc toujours compenser pratiquement la self-induction en réduisant l'amortissement, ou inversement se servir de cette self-induction pour aider à l'amortissement s'il est insuffisant.

Il existe, du reste, un autre procédé très simple pour compenser la self-induction et même l'amortissement; il suffit de shunter la résistance morte R′ par un condensateur réglable, dont nous appellerons c la capacité. On démontre, en effet, que l'on a alors, encore au deuxième ordre près, sensiblement

$$K\frac{d^2\theta}{dt^2}+\left(A+\frac{CL}{R+R'}-CcR'\right)\frac{d\theta}{dt}+C\theta=\frac{G}{R+R'}U.$$

On peut donc toujours annuler les deux premiers termes de la parenthèse, ou même la parenthèse tout entière, par un choix expérimental convenable de la capacité. Il va sans dire qu'il faut, pour que celle-ci soit bien définie, employer des condensateurs à mica ou à huile de ricin.

Mais en fait, l'amortissement et la self-induction, dans leurs limites ordinaires, laissent une précision suffisante pour que l'addition d'un condensateur soit inutile dans la pratique courante, la capacité propre des bobines étant déjà notable.

Conclusions. — Les nouveaux types d'oscillographes qu'on vient de décrire sont de beaucoup plus sensibles et plus précis que tout ce qui avait été décrit jusqu'ici; grâce à la simplicité et à l'interchangeabilité des organes, ils se prêtent à toutes les applications relatives à l'étude des courants alternatifs aussi bien dans les usines que dans le laboratoire.

Comme exemple de ces applications, l'auteur renvoie le lecteur à ses récentes applications sur l'arc électrique et sur l'interrupteur Wehnelt [1], et à une autre Note présentée au Congrès, sur l'étude des alternateurs. Les courbes qui y figurent démontrent mieux qu'on ne pourrait le dire l'utilité de ces recherches, qui eussent été presque impossibles sans ces instruments.

FRÉQUENCE-MÈTRE,

De M. Robert KEMPF-HARTMAN.

Les nombreux essais faits pendant une dizaine d'années, aussi bien par le monde savant qu'industriel, sur les courants alternatifs ont fait ressentir le manque d'un instrument permettant la détermination rapide et exacte de la fréquence de ces courants.

Des essais analogues ont conduit l'auteur à la construction de l'appareil décrit ci-après. A part l'emploi des moteurs synchroniques servant au même but, les méthodes et les instruments actuels se divisent en deux groupes principaux, l'un comprenant ceux où l'influence de la fréquence sur la résistance des bobines d'induction est employée. Cependant celles-ci se ressentent presque toutes des variations dans la tension d'une part, et de la forme de la courbe du courant d'autre part. On ne peut pas se servir de cette méthode pour la détermination de la fréquence des courants continus à battements.

Le deuxième groupe comprenant les instruments acoustiques avec des pièces d'acier à son réglé, résonnant sous l'influence d'un électro-aimant, est d'une plus grande utilité pratique. Des cordes tendues, des lames de fer et, principalement, des diapasons ont été employés dans les essais.

Pour pouvoir observer instantanément le commencement des fluctuations de fréquence, le diapason, dont le son devait être accordé à chaque fois par le déplacement de poids, a été remplacé

[1] *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, décembre 1899, mars et avril 1900.

par une série d'anches en acier semblables aux anches connues d'un orgue ou d'un harmonium. Ces anches résonnent très facilement et donnent un son fort. Dans la *fig.* 1 une anche

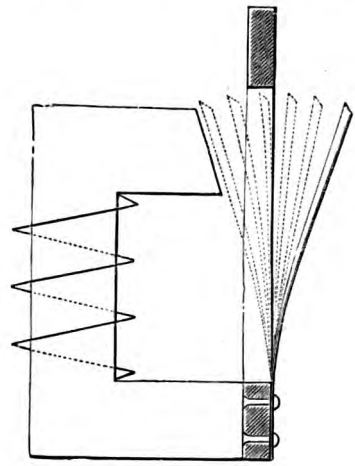


Fig. 1. — Principe.

vibrante est représentée, dont l'amplitude maximum est atteinte avec 20 watts. Pour produire le même effet par des poids agissant à l'extrémité libre, une traction de 0,4 kg est nécessaire ; on peut donc se rendre compte du degré de résistance propre à ces anches. Cette série de lames comprend l'étendue employée usuellement de 40 à 57 périodes par seconde, elle est accordée dans l'ordre des nombres entiers intercalés.

Les anches sont disposées dans l'appareil (*fig.* 2) presque concentriquement autour d'un électro-aimant rotatif. En réalité le dispositif représente une spirale, puisque l'anche plus courte correspondant au son ascendant produit une amplitude inférieure relativement aux anches plus grandes. Lorsque l'appareil est inséré en un point quelconque du circuit, comme à la place d'une lampe à incandescence, on tourne l'aimant jusqu'au résonnement distinct d'une lame; l'aiguille de l'instrument indique alors la fréquence respective. En mesurant il ne faut pas faire attention au son absolu, puisque c'est seulement l'anche accordée qui résonne. La photogravure ci-après (*fig.* 3) reproduit la proportion exacte entre l'amplitude d'une anche et la fréquence produite.

La *fig.* 3 représente des courbes émanant d'un point lumineux réfléchi par une anche vibrante sur une plaque photographique en mouvement. De cette figure symétrique divisée par la ligne médiane n'est reproduite ici que la partie supérieure.

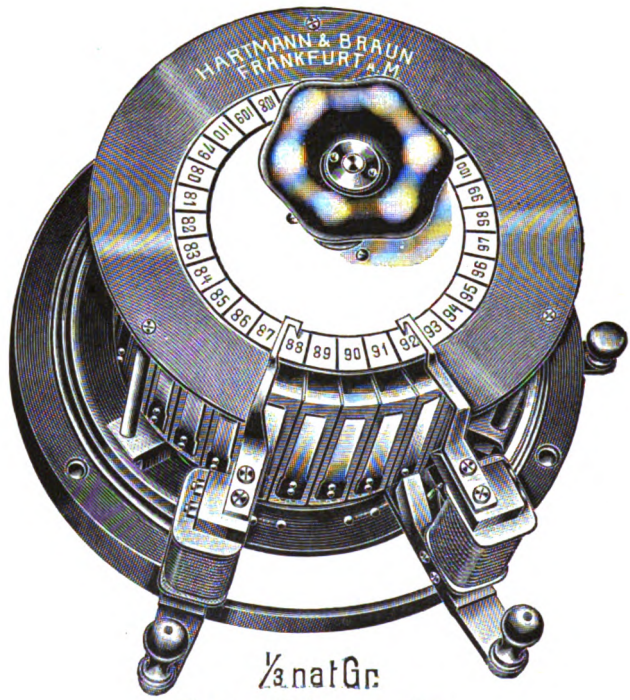


Fig. 2. — Fréquence-mètre.

Ces courbes sinusoïdales sont étroitement serrées l'une contre l'autre et leur hauteur correspond à leur amplitude respective, tandis que par les chiffres de droite à gauche la fréquence accroissante pendant l'essai est indiquée. L'effet sur l'ouïe est presque proportionnel au carré de l'amplitude de l'anche vibrante, et il en résulte que le lieu de résonance se trouve circonscrit dans des limites déterminées; cependant cet endroit est assez grand pour que l'anche soit excitée distinctement quand la fréquence est éloignée d'un demi-degré de l'échelle de l'entière résonance avec les anches avoisinantes. C'est donc avec une exactitude très rarement réclamée dans la pratique qu'on peut évaluer ce degré.

Si le nombre d'alternativités est exactement de 100,7 par

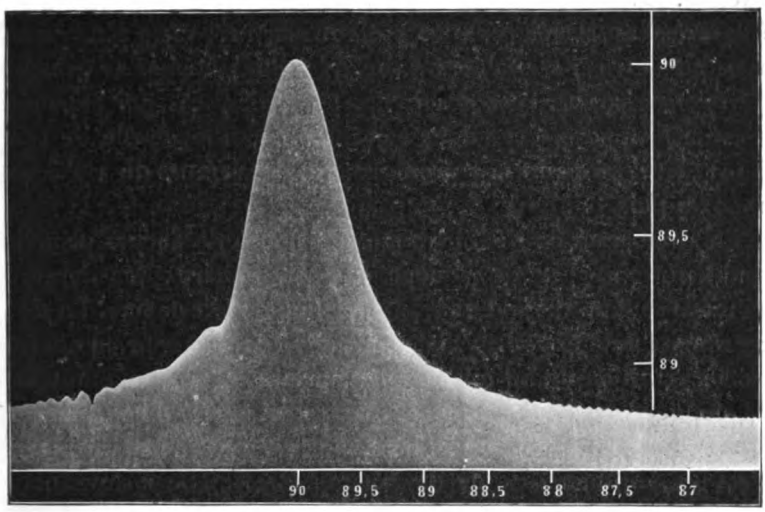


Fig. 3. — Inscription photographique de la résonance d'une anche vibrante.

seconde, l'anche 101 donnera le son le plus fort au passage de

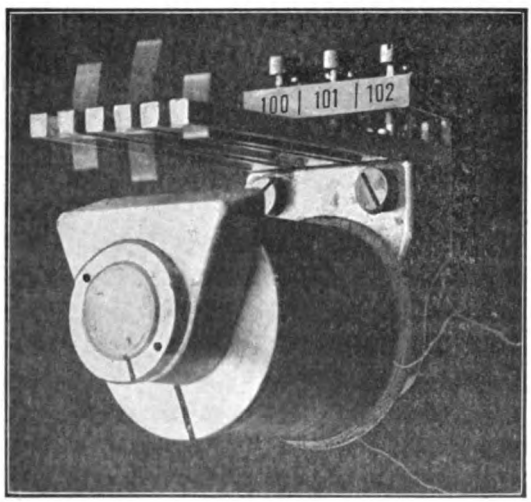


Fig. 4. — Électro-aimant à patin.

l'électro-aimant, tandis que l'anche 100 résonnera plus faible-

ment mais toujours plus fortement que 102 qui est également excitée. En évaluant ces sons on trouvera avec certitude que la fréquence est située dans les environs de 101, mais plus près de 100 que de 102; si elle était à 100,5 les deux anches avoisinantes devraient résonner avec des intensités égales, cas qui cependant n'est pas supposé. On a donc à évaluer dans l'intervalle de 100,5 à 101, où il ne pourra se produire que des erreurs de 1 à 3 pour 1000 au plus.

En comparant de l'œil les vibrations de trois anches produites simultanément par un aimant à patin polaire plus large, la méthode se simplifiera. La *fig.* 4 s'explique d'elle-même. La *fig.* 5 représente un appareil spécialement approprié à servir au contrôle ou au maintien d'une fréquence déterminée. C'est surtout pour l'étalonnage des instruments de mesure contenant du fer, lesquels sont employés pourtant dans les stations centrales où la fréquence n'est pas, ou du moins ne devrait pas être sujette à des fluctuations, que ces mesures de fréquence sont utiles.

L'appareil ne contient que deux anches entre lesquelles se rangent les fréquences respectives :

a. 99, 100, 101;
b. 98, 100, 102.

La sensibilité qui, dans le cas *b*, est de 2 pour 100, peut être variée. Souvent il n'est pas possible d'éviter des variations de 1 pour 100, aussi l'erreur d'étalonnement en résultant, quand même proportionnée au carré de la fluctuation d'alternances, est d'abord de 1 pour 100; mais à 2 pour 100 de fluctuation elle s'élève déjà à 4 pour 100. Les anches sont arrangées de façon qu'elles se laissent facilement intercaler. Le mode d'action de l'appareil se comprend bien par ce qui précède.

Aussi longtemps que la fréquence est exacte les anches avoisinantes ne résonnent que faiblement, mais aussitôt que la fréquence va croissant ou décroissant, celle de droite ou celle de gauche se met à retentir fortement. A la place de ce dispositif d'alarme acoustique, un signal optique peut être commandé également. L'appareil est agencé de telle sorte qu'à amplitude donnée la lame touche un levier qui, à son tour, ferme temporairement le circuit d'une sonnerie ou d'une lampe colorée.

Les appareils, dans l'exécution représentée par les *fig.* 3 et 4,

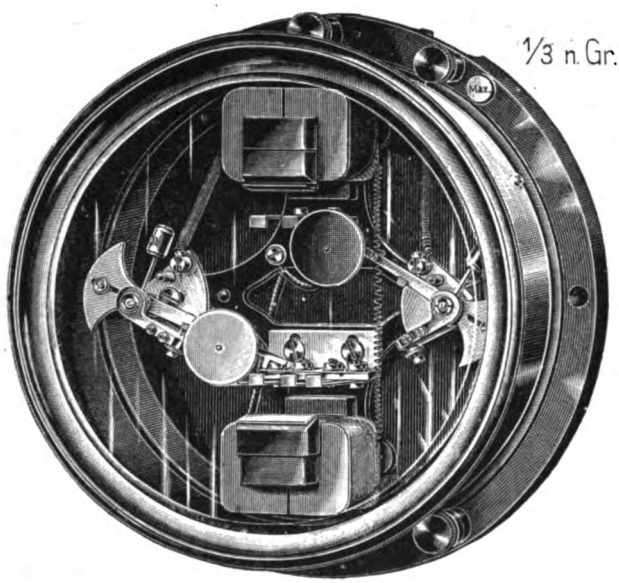


Fig. 5. — Appareil de contrôle d'une fréquence déterminée.

sont adaptés à des travaux avec des inducteurs agencés : par

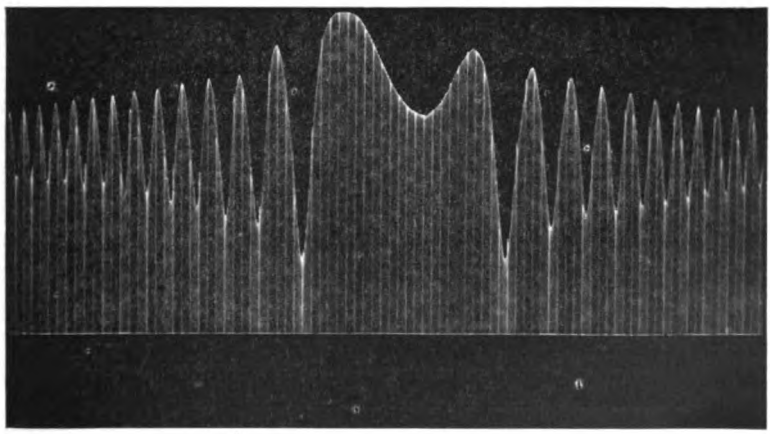


Fig. 6. — Inscription photographique des battements.

exemple avec un interrupteur Wehnelt. C'est là que le nombre

d'interruptions dépend essentiellement des rapports d'inductions des circuits primaires et secondaires et leur variation s'accomplit rapidement. A fréquence invariable on aperçoit distinctement les fluctuations entre des limites étroites.

En munissant l'aimant de l'appareil de deux enroulements séparés, on peut voir l'action intéressante qu'exercent deux courants alternatifs sur une anche. Pendant les vibrations de l'anche à amplitude égale au fur et à mesure du résonnement, des battements se produisent dès que l'autre générateur est inséré. Les battements sont d'autant plus nombreux que l'asynchronisme va croissant. Ils deviennent plus forts et distincts à l'approchement et ils se perdent au synchronisme parfait des alternateurs. Dans la *fig.* 6 un battement de 8 secondes de durée est reproduit; les demi-secondes sont fixées photographiquement. Même dans le cas où l'on ne réussirait pas à faire concorder parfaitement la fréquence invariée avec l'anche, le phénomène caractéristique serait également obtenu, comme il est représenté par la *fig.* 7 où

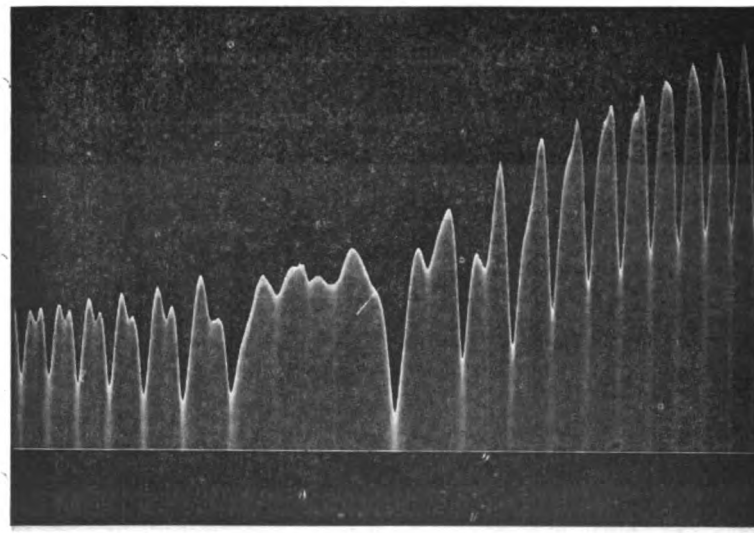


Fig. 7. — Discordance entre la fréquence du courant et le son propre de l'anche.

la fréquence d'excitation diffère du son propre de l'anche. C'est seulement par une vitesse croissante de la deuxième machine que, à un endroit donné, l'amplitude la plus grande est atteinte.

Dès le début, c'est-à-dire à vitesse angulaire égale des deux machines, les battements disparaissent. Les battements particuliers produits entre la fréquence constante et le son propre sont représentés par les petites inégalités dans les courbes et l'on peut voir, dans le travail des anches, que des effets magnétiques même compliqués s'y produisent.

L'appareil représenté par la *fig.* 2 peut être disposé pour mesurer les différences de vitesse dans les moteurs. Tous les appareils représentés par les figures ci-dessus sont fabriqués dans les ateliers de la maison Hartmann et Braun, à Francfort-sur-Mein-Bockenheim.

APPLICATION DES OSCILLOGRAPHES A L'ÉTUDE DES ALTERNATEURS;

PAR MM. ANDRÉ BLONDEL, DOBKÉVITCH, DURIS, FARMER ET TCHERNOSVITOFF.

Bien que l'on ait beaucoup publié et qu'on publie chaque jour sur les alternateurs, il y a encore pénurie de documents complets, notamment en ce qui concerne les réactions dont ces machines sont le siège en charge. Il nous a donc paru intéressant de procéder à une étude expérimentale complète de deux de ces machines au point de vue non seulement des valeurs efficaces, mais aussi des valeurs instantanées des forces électromotrices et des courants dont elles sont le siège. Nous publions aujourd'hui ces matériaux, nous réservant plus tard d'en tirer des déductions théoriques. Le but de cette Note est surtout de montrer l'intérêt de l'application des oscillographes à l'étude des machines.

Ces deux machines appartiennent au laboratoire de l'École supérieure d'Électricité, où M. Paul Janet les a mises obligeamment à notre disposition. Elles sont entraînées par un moteur à courant continu alimenté par une batterie d'accumulateurs, qui assure une vitesse parfaitement régulière.

Elles sont construites par la Société Gramme, suivant un type très vulgaire pour petites machines; ce sont des dynamos à 4 pôles, semblables à des dynamos à courants continus, à pôles fixes et à induit mobile, bobiné en tambour. Mais le bobinage continu est

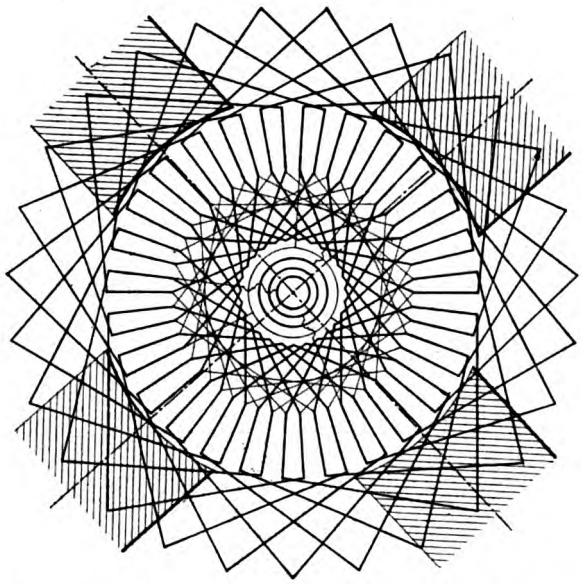


Fig. 1. — Génératrice triphasée. Bobinage en étoile; 54 rainures.

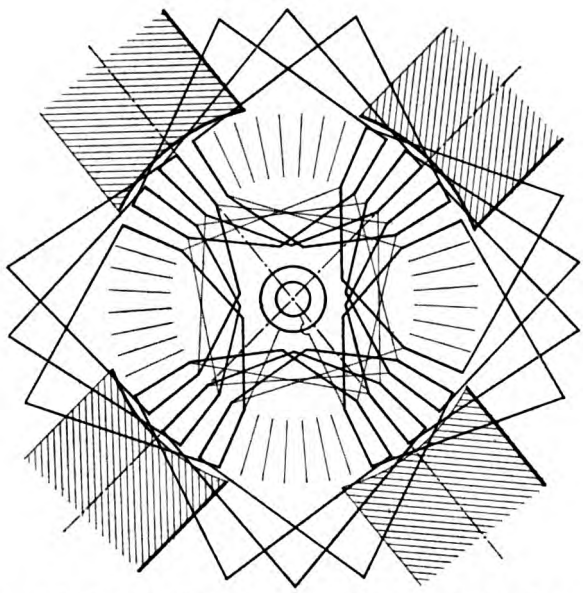


Fig. 2. — Génératrice diphasée. Schéma d'un des circuits; 52 rainures.

remplacé pour l'une par un bobinage triphasé, et pour l'autre par un bobinage diphasé.

Les *fig.* 1 et 2 indiquent les schémas de ces bobinages et le

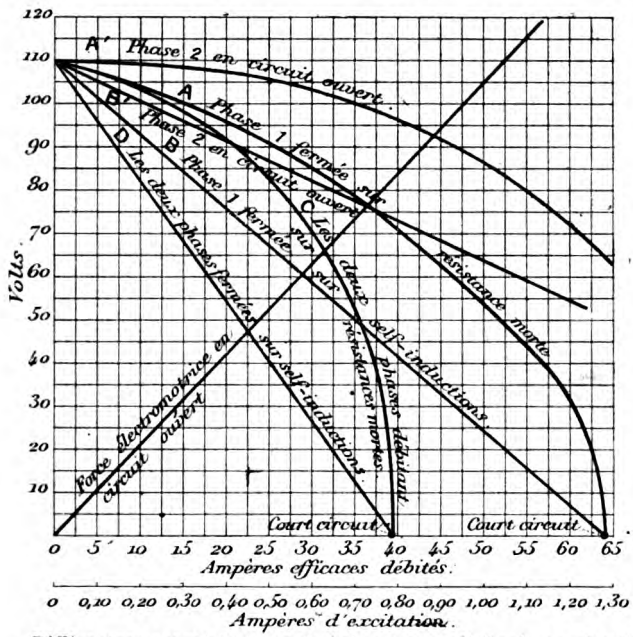


Fig. 3. — Différentes caractéristiques de l'alternateur diphasé, en circuit ouvert, en charge et en court-circuit.

Tableau ci-dessous résume leurs principales données de construction :

	Alternateur triphasé.	Alternateur diphasé.
Nombre de pôles inducteurs	4	4
Nombre de spires par pôle	13 et 14	14
Section des pièces polaires, en cm²	100	100
Diamètre de l'induit, en mm	310	310
Nombre d'encoches	54	52
Longueur des encoches, en mm	110	110
Profondeur des encoches, en mm	13	16
Largeur maxima des dents, en mm	9,8	9,8
Nombre de fils par encoche	6	7
Épaisseur d'entrefer, en mm	3	3,5
Force électromotrice normale efficace, en volts	110	110
Force étoilée de chaque phase, en volts	63	»
Courant normal efficace, en ampères	9	14
Puissance normale, en watts	1701	3080

Les résultats obtenus sont de deux sortes : les uns sont des courbes *caractéristiques* représentant les relations constatées entre les valeurs efficaces, les autres sont des courbes instantanées mettant en évidence la forme vraie des mêmes quantités.

1° *Courbes caractéristiques.* — Nous avons relevé, outre les courbes ordinaires, courbe en circuit ouvert, courbe de court-

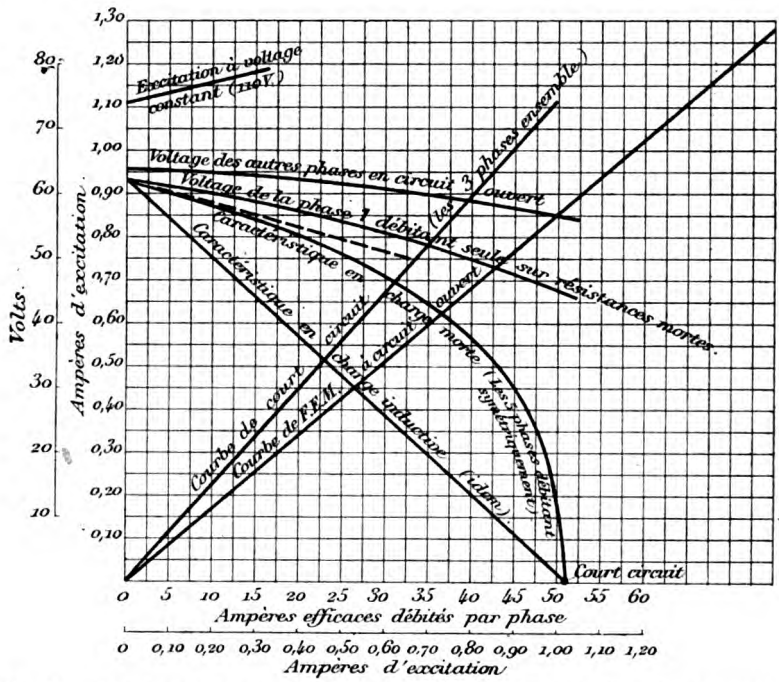


Fig. 4. — Différentes caractéristiques de l'alternateur triphasé à circuit ouvert, en charge et en court-circuit.

circuit, courbe en charge sur résistance morte avec phases équilibrées, d'autres courbes avec une seule phase chargée en prenant la force électromotrice aux bornes de chaque phase ; en outre nous avons fait débiter également sur résistances purement inductives, formées de bobines de self-induction du type hérisson, donnant un $\cos\varphi$ très voisin de zéro.

Les Tableaux I, II, III, IV ci-joints et les courbes (*fig.* 3 et 4) qui les représentent graphiquement résument tous les résultats.

L'inspection des courbes montre tout de suite que ces alternateurs travaillent très loin de la saturation ; leurs courbes en circuit ouvert, en court-circuit et en courant déwatté sont ainsi des lignes droites parfaites ([1]).

TABLEAU I. — ALTERNATEUR TRIPHASÉ.

1350 tours, 45 ∼. Excitation constante 1,125 ampères, 110 volts par phase, montage en triangle, 62 volts, montage en étoile.

Caractéristique à circuit ouvert.

Ampères d'excitation.	Volts aux bornes d'une phase.
0,0	0,69
0,04	2,82
0,12	6,74
0,18	10,97
0,24	14,43
0,30	17,75
0,34	19,96
0,39	23,20
0,43	25,40
0,61	34,40
0,84	47,40
1,00	57,20
1,06	61,00
1,11	63,30
1,15	65,80
1,20	68,30
1,24	70,00
1,28	71,80
1,32	74,50
1,42	79,90
1,64	90,90
1,77	96,59
1,83	99,40
1,87	101,10
2,06	108,40

Caractéristique en court-circuit.

Ampères d'excitation.	Ampères de l'induit.
0,0	0
0,08	2,5
0,14	6,2
0,24	10,6
0,37	16,2
0,54	23,7
0,67	29,3
0,79	38,3
0,89	39,8
1,00	45,0
1,06	48,0
1,10	59,0

Caractéristique à voltage constant = 110 volts (60 volts *par branche*).

1,11	0
1,11	2,0
1,12	4,1
1,13	5,5
1,13	7,6
1,15	9,8
1,17	11,4
1,18	13,1
1,19	14,75

([1]) Il va sans dire qu'une semblable construction correspond à une mauvaise utilisation des matériaux et ne peut donner lieu à aucune remarque intéressante. Nous eussions préféré opérer sur une machine saturée, mais l'École n'en possède pas.

TABLEAU II. — Caractéristiques en charge (symétriquement).

Sur résistances inductives en triphasé.

Volts.	Ampères.
62	0
51	7,5
49,5	10,0
44,0	14,1
38,0	18,6
36,0	20,3
32,0	24,1
27,5	29,7
16,3	38,1
12,5	40,8
6,7	43,6
1,0	47,5
0	50,0

Caractéristique en charge sur résistance morte en monophasé.

Ampères.	Volts de la phase chargée.	Volts des phases ouvertes.
10	60	63
15,5	58,6	62,5
20,1	54,7	62,0
25,0	55,5	61,0
30,8	54,0	60,6
35,8	52,0	60,3
41,0	49,6	59,3
48,8	45,5	57,0

Sur résistances mortes en triphasé.

Volts.	Ampères.
62	0
60	3,3
58	6,2
57	11,2
56	13,9
55	17,0
47	29,0
41,5	36,8
35,5	41,5
32,5	43,8
27,0	46,8
25,2	47,6
21,2	48,4
18,3	48,9
16,0	49,1
12,7	49,8
11,1	49,9
9,5	59
3,0	59
0	59

TABLEAU III. — Alternateur diphasé.

1350 tours 45 ∼.

Caractéristique d'excitation.

Ampères d'excitation.	Volts.
0,066	5,5
0,084	7,0
0,105	10,0
0,15	14,6
0,234	23,6
0,24	24,6
0,285	29,0
0,348	35,5
0,39	39,5
0,439	45,5
0,48	48,0
0,54	59,0
0,60	62,0
0,645	66,0
0,696	72,0
0,765	79,5
0,81	84,5
0,87	90,5
0,915	95,0
0,96	101,0
0,993	105,0
1,02	107,4
1,032	108,2
1,038	109,0
1,065	112,3
1,095	115,5
1,119	118,0
1,182	120,0
1,221	125,5

Caractéristique en charge en diphasé.

1° *Sur résistance morte.*

Volts.	Ampères.
110	0
105	8
99	14,5
81	26,2
68	30,2
48,5	36,5
34,5	40,2
20,0	42,0
17,6	41,2
13,0	40,2
11,6	41,0
9,5	40,5
0	39,5

2° *Sur résistance inductive.*

110	8
85,8	0
80,2	10,2
72,5	12,5
66,4	15,2
61,3	17,3
53,7	20,2
48,5	22,0
46,2	23,0
40,7	25,0
29,8	29,2
23,2	31,2
19,2	33,9
15,0	34,5
0	39,5

TABLEAU IV. — Alternateur diphasé.

Caractéristique en charge en courant alternatif simple.
Excitation constante 1,02 ampère.

1° *Sur résistance morte.*

Ampères.	Volts phase chargée.	Volts phase ouverte.
0	110	110
7,0	105,8	109,6
14,0	101,0	108,5
19,7	96,5	107,5
24,2	92,0	105,7
28,1	87,0	103,2
32,2	82,5	101,5
37,0	76,4	98,4
41,8	68,5	96,0
51,0	51,0	85,0
55,9	41,5	80,0
60,0	31,0	75,0
64,0	0	66,5

2° *Sur résistance inductive.*

Ampères.	Volts phase chargée.	Volts phase ouverte.
0	110	110
5,1	99,5	104
7,0	96,2	102
9,0	93,5	100,8
12,5	88,0	98
15,3	82,5	95
18,6	78,5	92,8
21,1	74,0	89,1
23,5	69,0	85,5
27,1	62,5	82,5
30,1	57,0	81,0
32,2	54,3	79,6
34,9	50,0	77
38,0	44,5	75,5
41,3	40,2	72,0
43,3	36,3	69,7
45,6	32,0	65,0
50,7	25,0	63,5
54,0	21,0	63,0
56,7	19,0	61
58,0	17,0	60
64,0	0	

Il en est de même des deux courbes BB′ correspondant au cas où une seule phase est en court-circuit.

Les courbes en charge sur résistance morte sont sensiblement des ellipses, comme l'indique la loi de Joubert.

On peut donc dire que ces alternateurs sont sensiblement des alternateurs théoriques.

Cependant, comme on va le voir, leurs courbes de forces électromotrices sont très déformées.

2° *Courbes instantanées.* — Les *fig.* 5 à 24 représentent toute une série de courbes instantanées prises sur les mêmes alternateurs en vue de mettre en évidence l'influence de la charge d'une seule phase sur elle et sur les autres et l'influence de la charge totale sur la force électromotrice aux bornes de l'induit et aux bornes de l'inducteur.

Les régimes efficaces correspondants, qui définissent la condition de chaque expérience, sont résumés dans les Tableaux V et VI. Dans tous les essais on a maintenu le courant d'excitation constant; il était produit par des accumulateurs et tendait à baisser sous les fortes charges par l'effet des réactions pulsatoires produites par l'induit; il fallait donc augmenter le nombre d'éléments ou diminuer la résistance ajoutée en circuit pour rétablir la même valeur du courant.

Ces courbes ont été relevées à l'aide d'un oscillographe double; on prenait, s'il y avait plus de deux courbes ensemble, plusieurs photographies successives de deux courbes, dont une toujours commune, qui sert de repère pour superposer ensuite les divers éléments relatifs à la même expérience.

Le sens des temps croissants est de droite à gauche dans toutes les figures, sauf deux qui ont été retournées par erreur.

Les *fig.* 5 à 14 se rapportent à l'alternateur triphasé travaillant d'abord sur une seule phase (*fig.* 7 à 14) ou sur les trois symétriquement (*fig.* 5 et 6).

La force électromotrice en circuit ouvert (*fig.* 5) s'éloigne peu de la sinusoïde; elle n'est pas sensiblement dentelée, grâce à la présence d'un large entrefer qui adoucit l'arrachement au passage des dents devant les pôles.

Dans les expériences 6 et 7, le rhéostat est une cuve électrolytique à électrodes en zinc dans du sulfate de zinc. Contrairement à ce qu'on avait pensé, cette cuve, soumise à une trop forte densité de courant qui amène la caléfaction locale du liquide, introduit du décalage en avant et de la distorsion du courant. Dans les expériences 7 et 11, le rhéostat est mixte (cuve et lampes en parallèle). Partout ailleurs, il est formé de batteries de lampes en parallèle.

Les courants et la force électromotrice sont pris entre les balais de chaque phase et le point neutre commun aux diverses phases.

Ces résultats montrent bien que la charge d'une des phases fait baisser la force électromotrice de toutes les phases, mais inégalement; dans les expériences 6 et 7, il y a, au contraire, léger relèvement parce que le rhéostat liquide produit un effet de capacité. En outre, les deux phases non chargées subissent des effets de distorsion inverse, la courbe de l'un devenant plus pointue et celle de l'autre plus aplatie, tandis que la courbe chargée reste voisine de la sinusoïde.

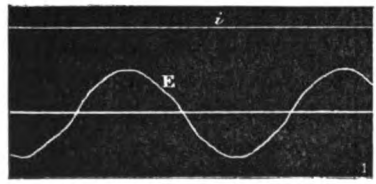


Fig. 5.

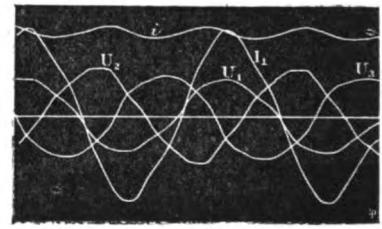


Fig. 8.

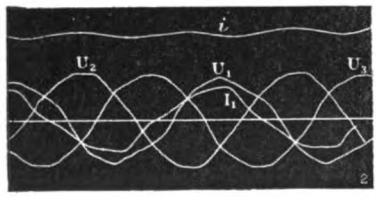


Fig. 6.

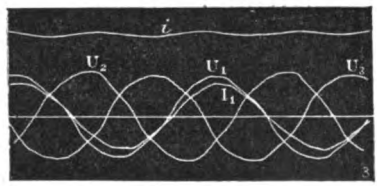


Fig. 7.

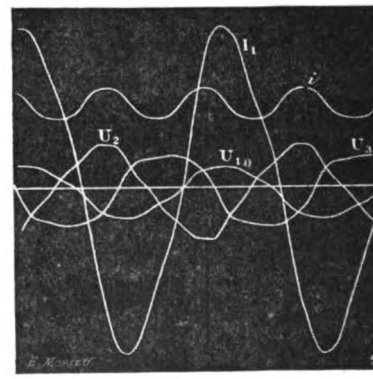


Fig. 9.

On remarquera en outre que le courant des inducteurs devient de plus en plus pulsatoire quand le courant de l'induit augmente et que sa pulsation est de fréquence différente suivant qu'une seule période est chargée ou toutes les trois. Dans le premier cas, qui est celui des alternateurs simples, la pulsation est de fréquence double de la fréquence du courant, comme l'un de nous

TABLEAU V.

N° de la figure.	OBJET DE L'EXPÉRIENCE.	NATURE du circuit de charge.	INTENSITÉ du courant de l'induit phase 1.	TENSION AUX BORNES. Phase 1.	Phase 2.	Phase 3.	INTENSITÉ du courant d'excitation.	TENSION aux bornes des inducteurs.
	Alternateur triphasé (vitesse : 1350 tours; excitation : 1,08 ampère).							
5	Circuit ouvert	nulle	0	63	63	63	1,08	90
6	1 phase chargée	liquide	9,3	59,5	63,5	64	»	94
7	» »	lampes	10	60	64,5	63	»	90,5
8	» »	»	25,7	55	65	61	»	95
9	» »	mixte	50	44	63,5	55,6	»	95
10	3 phases chargées équilibrées	lampes	11,2	57	57	57	»	90
11	» »	mixte	29,5	47,5	47,5	47,5	»	90
12	3 phases chargées équilibrées sur circuit inductif	self	10	51	51	51	»	90 88,5
13	3 phases chargées équilibrées sur circuit inductif	»	32	24,1	24,1	24,1	»	90
14	Court-circuit	»	47,5	1	1	1	»	90
	Alternateur diphasé (1350 tours, 45 ∼).							
15	Force électromotrice en circuit ouvert.	"	0	"	"	"	1,02	89
16	Les deux phases également chargées	lampes	14,5	99	99	"	»	89,5
17	» »	»	22,8	86,2	85,8	"	»	90
18	Phase 1 seule fermée sur résistance	»	24,5	93,5	107,8	"	»	93,5
19	Les deux phases en court-circuit	»	39,5	0	0	"	»	"
20	Court-circuit de la phase 1 seule	»	62,5	0	60	"	»	"
21	Les deux phases chargées sur self	self	15	69,5	69,5	"	»	"
22	» »	»	25,8	35,5	35,5	"	»	"
23	Phase 1 seule chargée sur self	»	34,2	50	76	"	»	"
24	» »	»	15,3	82	94	"	»	"

l'avait déjà montré en 1891 (¹). Au contraire, avec les trois phases

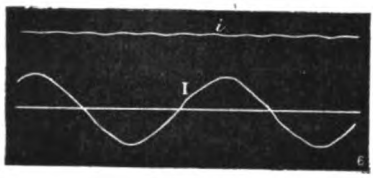


Fig. 10.

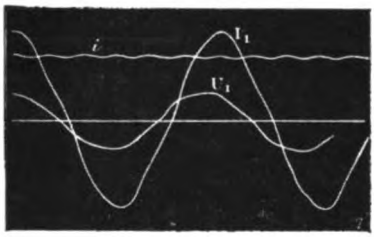


Fig. 11.

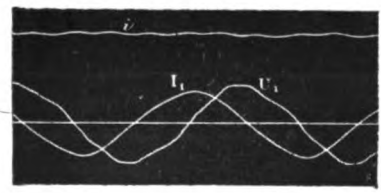


Fig. 12.

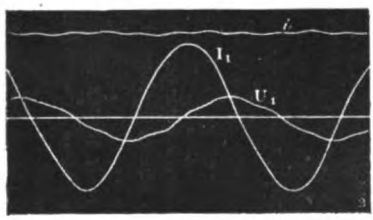


Fig. 13.

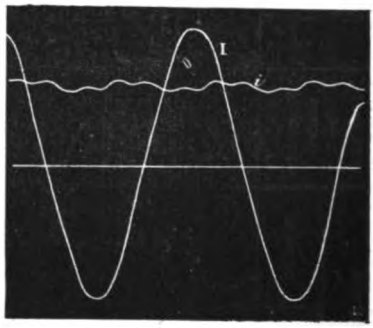


Fig. 14.

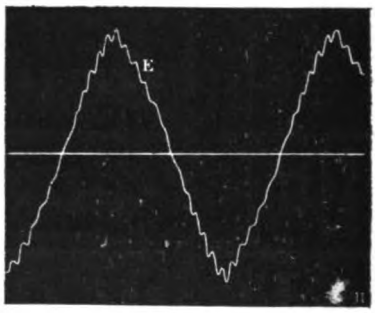


Fig. 15.

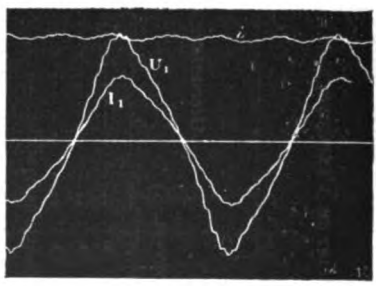


Fig. 16.

chargées symétriquement, la fréquence est six fois celle du cou-

(¹) A. Blondel, *La Lumière électrique*, 12 septembre 1891, p. 515.

rant et d'amplitude bien plus faible. On s'en rend du reste compte aisément théoriquement en analysant la réaction de l'induit. La force magnétomotrice opposée dans les pièces polarisées se repro-

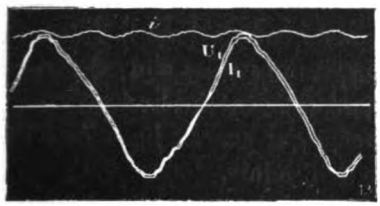


Fig. 17.

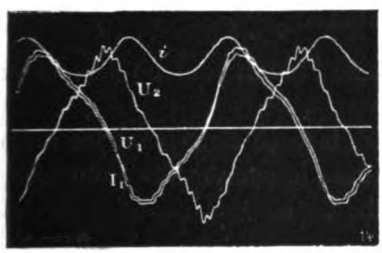


Fig. 18.

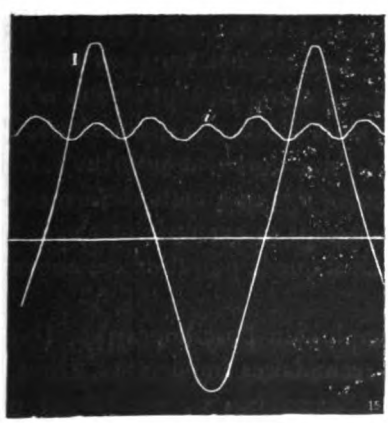


Fig. 19.

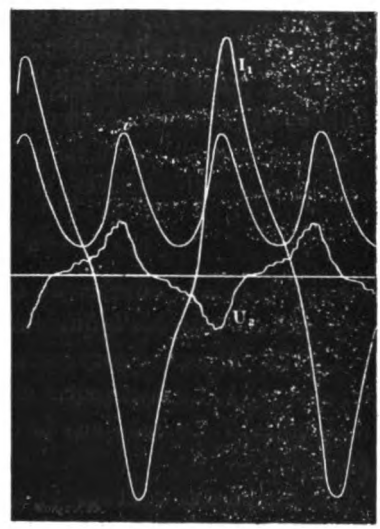


Fig. 20.

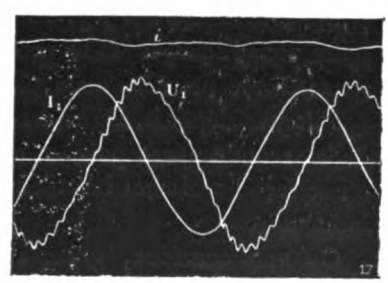


Fig. 21.

duit tous les $\frac{1}{6}$ de période, elle oscille entre un maximum et un minimum de $\frac{1}{12}$ en $\frac{1}{12}$ de période. De même la fréquence est quatre fois celle du courant dans les machines diphasées.

Il est curieux, sur la *fig.* 14, de constater le mélange de ces fréquences doubles et sextuples dû sans doute à l'effet prépondérant d'une des phases.

La même analyse montre que la réaction d'un alternateur diphasé doit présenter une fréquence quadruple de la fréquence propre. C'est bien en effet ce qu'on vérifie sur les *fig.* 16 à 19.

Notre second alternateur diphasé est plus intéressant que le premier, grâce à son faible entrefer qui accroît beaucoup l'influence des dentures et la réaction de l'induit.

Grâce au premier de ces effets, la force électromotrice (*fig.* 15), au lieu d'être sinusoïdale, est de la forme

$$E_0 \sin \omega t \sin(2 n \omega t),$$

en appelant n le nombre de dents de l'induit sous un arc correspondant *au pas* des inducteurs.

Les dentelures se conservent dans la force électromotrice même en charge, et se font sentir aussi dans le courant des inducteurs, mais elles s'effacent dans la courbe du courant quand il devient fort.

L'examen des courbes 11 à 20 montre encore que la réaction sur les inducteurs change de fréquence suivant qu'on fait débiter une ou deux périodes. Les courbes 11 à 15 montrent une déformation croissante de la sinusoïde. Les courbes les plus intéressantes sont celles des *fig.* 16 à 20 qui se rapportent au cas d'une seule phase chargée; il se produit alors d'énormes distorsions, de sens inverse pour les deux phases, l'une devenant pointue tandis que l'autre s'aplatit. En court-circuit (*fig.* 20), cette déformation de la seconde phase perd en même temps sa symétrie et s'exagère d'une façon vraiment inattendue, ainsi que la pulsation du courant inducteur.

On voit combien, grâce à l'emploi de l'oscillographe, il est facile de déceler des phénomènes secondaires importants. Dans le cas que nous avons étudié, ces déformations ne paraissent pas modifier beaucoup la loi que suivent les valeurs efficaces, puisque les caractéristiques conservent, comme on l'a vu, des formes normales; cela tend à justifier l'emploi général que l'on fait de l'hypothèse sinusoïdale pour les calculs, sans se préoccuper des déformations très grandes de la courbe avec la charge. On voit aussi

combien est illusoire un calcul de la répartition du flux inducteur si l'on ne tient pas compte de l'effet de l'induit.

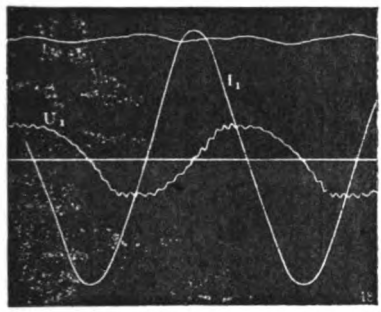


Fig. 22.

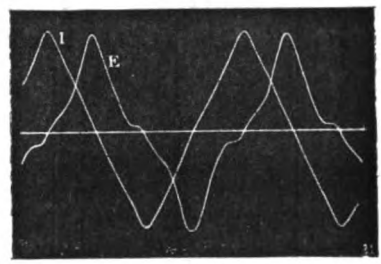


Fig. 25.

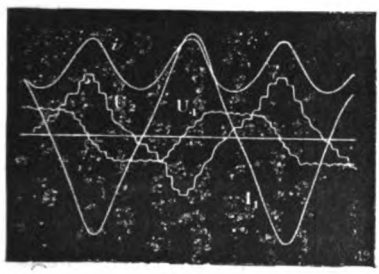


Fig. 23.

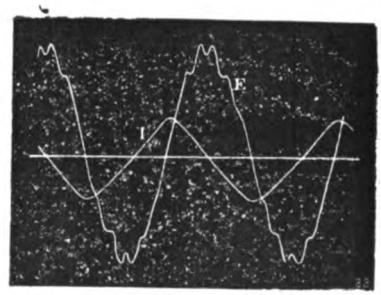


Fig. 26.

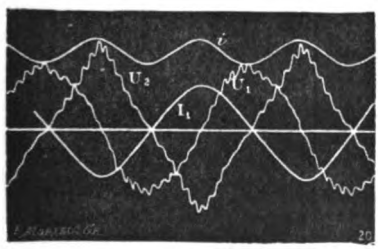


Fig. 24.

Mais ce n'est qu'en répétant de semblables essais sur de nombreuses machines qu'on pourra en déduire des conséquences générales et formuler, s'il y a lieu, des lois plus certaines sur ces déformations et leur influence efficace des variables.

Enfin, à titre de comparaison, nous mettons en regard des courbes précédentes celles de deux autres alternateurs connus, relevés à la même époque : l'alternateur Ganz du secteur rive gauche (*fig.* 25) et l'alternateur Labour, ancien type (*fig.* 26).

TÉLÉVISION AU MOYEN DE L'ÉLECTRICITÉ;

Par M. Constantin PERSKYI.

Les diverses méthodes proposées jusqu'ici pour reproduire à distance des radiations lumineuses représentant l'image d'un objet au moyen de l'électricité ont pour base certains phénomènes que nous allons examiner.

En 1839, M. Becquerel père mit en évidence l'action de la lumière sur deux corps mis en contact entre eux et pouvant agir chimiquement l'un sur l'autre; il prenait des plaques de cuivre oxydées sur lesquelles il projetait un spectre. Il obtint un courant dont l'intensité était proportionnelle aux diverses radiations reçues et put construire sur ce principe un vrai photomètre.

En 1883, le professeur Borgmann, à Saint-Pétersbourg, expérimenta une batterie photo-électrique avec plaques d'argent iodurées. Plus tard, les expériences de M. Mercadier avec l'argent montrèrent l'action intermittente de la lumière oxhydrique et, en particulier, l'influence des diverses couleurs sur la force électromotrice produite.

De tous les corps, celui dont les propriétés électriques subissent le plus de variations sous l'effet des radiations lumineuses est certainement le *sélénium*. Les qualités de ce corps varient suivant qu'il est fondu ou solide.

La résistivité de ce corps se trouve assez fortement modifiée sous l'action des radiations lumineuses pour qu'on ait songé à l'appliquer à transmettre les sons à distance (radiophone Bell). Malheureusement, ce phénomène n'est pas aussi rapide qu'on pourrait le penser et la diminution de résistivité sous l'action de la lumière met un temps appréciable à se produire. On admet que

la conductivité du sélénium est proportionnelle à la racine carrée de l'intensité lumineuse.

D'autres corps ont leur résistivité modifiée sous l'influence de la lumière; ce sont : la suie, les sulfures mélangés à du sélénium, l'aluminium mêlé au sélénium.

Il existe encore d'autres phénomènes que l'on peut utiliser, par exemple l'aimantation sous l'action des rayons ultra-violets, enfin l'action d'un champ magnétique sur le plan de polarisation de la lumière. On pourra donc appliquer ces phénomènes ensemble ou séparément au problème de la télévision.

Principe de la télévision. — On décompose l'image à transmettre en une infinité de points lumineux qui, pris isolément, peuvent être considérés comme autant de sources lumineuses d'intensité variable.

Au moyen de miroirs, on soumet le sélénium à l'action de ces divers points lumineux. Le sélénium est intercalé dans le circuit du récepteur de l'autre station. Ce récepteur consiste en un électro-aimant attirant une armature, laquelle peut ouvrir et fermer plus ou moins la source artificielle de lumière à l'aide d'un écran. Les rayons émis par cette source tombent sur un système de miroirs tout à fait semblables aux miroirs du transmetteur et identiquement situés l'un par rapport à l'autre. Les miroirs transmetteurs et récepteurs sont animés d'un mouvement oscillatoire identique et parfaitement synchrone. Si l'on se rappelle que la résistivité du sélénium est d'autant plus faible que l'éclairage est plus intense et que, d'autre part, l'attraction de l'électro-aimant est d'autant plus énergique que le courant est plus intense, on comprendra facilement que l'intensité lumineuse de la source du poste de réception suivra les fluctuations du transmetteur. On aura à l'arrivée tous les points de l'image à transmettre, et si la durée de projection de tous les points élémentaires ne dépasse pas 0,1 seconde, on verra tous ces points ensemble et simultanément.

Pour arriver à ce résultat, la vitesse d'oscillation des miroirs doit être très grande; par exemple, pour transmettre une image de 10 cm sur 15 cm au moyen de miroirs de 0,25 mm de largeur, cette vitesse est de 360 000 oscillations par seconde. Les appareils de télévision imaginés sur ce principe jusqu'à présent sont ceux

de MM. Nipkoff, Kachmetieff, Stchepanik, Scheffler et Poloumordvinoff.

Conclusion. — En général, la résolution du problème de la télévision pourra être considérée comme trouvée quand on possédera le moyen de transformer par un procédé simple les ondes de grande longueur en ondes très courtes, et réciproquement.

DEUXIÈME SECTION.

SOUS-SECTION A.

SUR LA PRÉDÉTERMINATION DE LA CHUTE DE TENSION DANS LES ALTERNATEURS POLYPHASÉS PAR LA THÉORIE DES DEUX RÉACTIONS;

PAR M. JEAN REY.

Nous avons eu, depuis plusieurs années, l'occasion de rechercher à prédéterminer la chute de tension d'alternateurs triphasés, d'un type spécial, dans un cas où cette détermination présente des difficultés particulières.

La méthode que nous avons employée est basée sur une théorie due à M. A. Blondel, désignée sous le nom de *théorie des deux réactions* et dont le principe, que nous allons rappeler rapidement, a été indiqué dans diverses publications (1).

Théorie des deux réactions. — Dans la théorie des deux réactions, lorsque l'alternateur est en charge, on considère le flux magnétique total, qui traverse le circuit magnétique induit et inducteur, comme résultant de la composition de deux flux magnétiques, l'un produit par les ampères-tours inducteurs, l'autre produit par les ampères-tours induits. Le flux magnétique dû à l'induit est à son tour décomposé en deux autres; l'un, cor-

(1) A. BLONDEL, *Sur les réactions des alternateurs* (*Comptes rendus*, t. CXXIX, 16 octobre 1899, p. 586); *Sur la théorie empirique des alternateurs* (*L'Industrie électrique*, 10 novembre, 10 décembre et 25 décembre 1899).

respondant au courant watté qui traverse l'induit, et l'autre au courant déwatté. Les mots de courant watté et de courant déwatté s'appliquent aux courants qui sont en phase ou à 90° avec la force électromotrice induite intérieure totale.

Le flux produit par le courant déwatté de l'induit est en opposition directe avec le flux inducteur, il traverse le circuit complet de la machine. Il donne lieu à une réaction directe et s'exprime par des contre-ampères-tours équivalents ou, si les inducteurs sont loin de la saturation, par une réactance correspondante.

Le flux produit par le courant watté de l'induit donne lieu à une réaction transverse; il se ferme, en effet, par le pôle inducteur et ne traverse qu'une faible portion du circuit magnétique de la machine. Pour ce motif, il paraîtrait peu rationnel de traduire cette réaction par des contre-ampères-tours; on la représente par une réactance analogue à celle d'une self-induction. Enfin, à ces deux flux principaux s'ajoute un flux de fuites produit par les lignes de force qui se ferment directement entre les enroulements induits; il faut y joindre également un flux accessoire qui part de l'induit dans les intervalles des pièces polaires et vient se fermer par la pièce polaire elle-même.

Formule générale dans le cas d'un alternateur non saturé. — L'étude que nous avons faite se rapporte au cas d'un alternateur non saturé où les deux réactions du courant watté et du courant déwatté peuvent se représenter par une réactance correspondante, dont la valeur est donnée en ohms.

L'épure générale, qui permet de déterminer la force électromotrice intérieure totale, correspondant à une tension aux bornes donnée et à un courant donné, dans un alternateur dont les deux réactions directe et transverse sont connues, est représentée à la *fig.* 1. Les notations employées sont les suivantes:

U, tension aux bornes;
E, force électromotrice intérieure totale;
r', résistance apparente égale à la somme de la résistance ohmique d'un circuit et de la résistance réduite correspondant aux courants de Foucault;
I, courant total;

ψ, angle de décalage du courant avec la force électromotrice intérieure totale;

φ, angle de décalage du courant avec la tension aux bornes;

ωs, réactance due aux fuites magnétiques de l'induit et au flux accessoire, lorsque le courant est watté;

$\omega s'$, réactance due aux fuites magnétiques de l'induit et au flux accessoire, lorsque le courant est déwatté;

$\omega\lambda$, réactance principale transverse;

$\omega\lambda'$, réactance principale directe;

R, résistance ohmique du circuit extérieur;

ωL, réactance du circuit extérieur;

ωl, réactance totale transverse;

$\omega l'$, réactance totale directe.

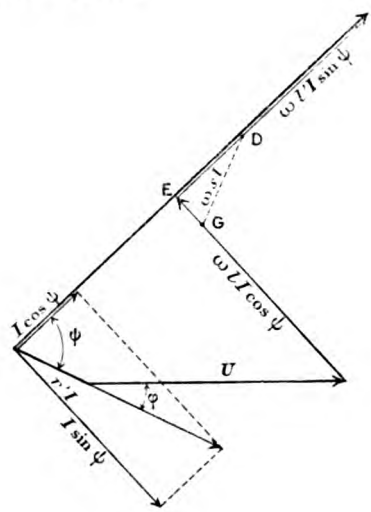


Fig. 1.

Les réactances totales transverse ou directe étant la somme des réactances principales et de celles dues aux fuites magnétiques et aux flux accessoires, on peut donc écrire

$$\omega l = \omega\lambda + \omega s, \qquad \omega l' = \omega\lambda' + \omega s'.$$

Les formules générales établies par M. Blondel se rapportent au cas de l'alternateur peu saturé. Le même auteur a indiqué également comment il faut modifier ces formules pour les appli-

quer au cas d'un alternateur saturé, travaillant dans le coude de la caractéristique.

Notre étude se rapporte au premier cas. Nous indiquons ci-dessous les formules à conserver.

La valeur de l'angle ψ est alors donnée par l'expression

$$\operatorname{tang}\psi = \frac{U\sin\varphi + \omega l I}{U\cos\varphi + r' I}.$$

La valeur de la force électromotrice intérieure totale est donnée par l'expression suivante :

$$E = I\frac{(R + r')^2 + \omega^2(L + l)(L + l')}{\sqrt{(R + r')^2 + \omega^2(L + l)^2}}.$$

La valeur de la résistance ohmique du circuit extérieur s'obtient immédiatement :

$$R = \frac{U\cos\varphi}{I}.$$

La valeur de la réactance extérieure a pour expression

$$\omega L = \frac{U\sin\varphi}{I}.$$

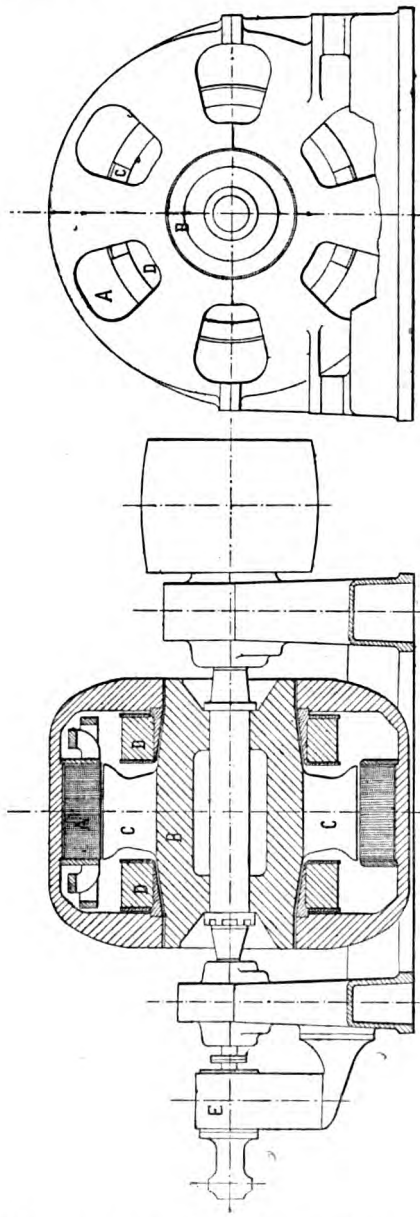
Lorsque le circuit extérieur ne renferme pas de self-induction et qu'il n'imprime pas, par suite, de décalage entre la tension aux bornes et le courant, l'angle φ est nul et les valeurs de l'angle ψ ainsi que de la force électromotrice intérieure totale sont données par les expressions

$$\operatorname{tang}\psi = \frac{\omega l I}{U + r' I}, \qquad E = I\frac{(R + r')^2 + \omega l . \omega l'}{\sqrt{(R + r')^2 + \omega^2 l^2}}.$$

Vérification de la théorie des deux réactions sur une machine à fer tournant à un seul induit et à trois entrefers. — Dans beaucoup d'alternateurs industriels non saturés, les réactances sont assez peu différentes pour qu'on ne fasse pas une grande erreur en les confondant ; mais il n'en est pas de même avec le type que nous allons considérer, qui peut donner lieu à des réactances très inégales. C'est un cas pour lequel la théorie précédente présente un intérêt particulier.

La machine sur laquelle nous avons effectué la vérification de la

théorie a été construite par MM. Sautter, Harlé et Cie. Les essais



de cet alternateur ont été effectués avec beaucoup de soin, dans

leurs ateliers, à la fin de l'année 1899, par M. Jigouzo, ingénieur civil des mines, dans les conditions les plus variées. Nous ne retiendrons ici que les expériences ayant eu pour objet de faire débiter l'alternateur sur des résistances extérieures, sans self-induction, ne produisant aucun décalage entre le courant et la tension aux bornes.

Cet alternateur triphasé a été construit pour fournir en marche normale une puissance de 60000 watts à la tension composée de 5200 volts aux bornes, soit 3000 volts de tension par phase.

La forme générale de la machine est représentée sur la coupe verticale de la *fig.* 2 et sur la *fig.* 3; l'induit fixe A est pourvu d'encoches semi-fermées, au nombre de 6 par champ. L'inducteur tournant B est formé d'une pièce massive, portant quatre protubérances homopolaires C; chaque champ renferme une bobine par circuit et chaque bobine 165 spires. La machine tourne à 750 tours par minute pour la fréquence de 50 périodes par seconde.

L'excitation est fournie par deux bobines fixes, DD, placées de chaque côté des masses polaires. Le flux magnétique inducteur, au sortir de chaque masse polaire, se partage en deux flux parallèles, qui traversent l'induit et reviennent par la culasse et les flasques jusque dans le noyau mobile.

Cet alternateur est pourvu de trois entrefers: un entrefer principal e entre les masses polaires et l'induit, il est de 10 mm; un entrefer e', placé entre l'induit et la culasse, sa valeur est de 2 mm; enfin, un troisième entrefer e'', entre les flasques et le noyau mobile, il est de 2 mm également.

Nous donnons *in extenso* les constantes de cet alternateur pour permettre de vérifier les calculs qui suivront :

CONSTANTES DE L'ALTERNATEUR.

Diamètre intérieur de l'induit en cm.....	74
Longueur de l'induit, isolé au papier, en cm.	27
Diamètre extérieur de l'induit, en cm.....	94
Diamètre du noyau inducteur, en cm.....	34
Longueur » »	288
Diamètre des pièces polaires, en cm.....	72
Longueur d'un demi-champ l, comptée sur la périphérie de l'induit, en cm.....	29

Longueur des lignes de force dans le noyau, en cm	60
Longueur des lignes de force dans la culasse et les flasques, en cm	48
Induction dans la culasse et les flasques, en gauss	14000
Section moyenne du circuit magnétique, en cm²	702
Réluctance magnétique pour la culasse et les flasques	0,0000400
Induction dans le noyau, en gauss	8700
Section du noyau, en cm²	1130
Réluctance magnétique de la partie tournante	0,0000183
Surface polaire de l'entrefer principal s, en cm²	690
Induction dans l'entrefer, en gauss	5940
Induction à l'entrée dans le fer doux, en gauss	6660
Induction au sortir du pôle, en gauss	6200
Distance entre les axes de deux encoches, en mm	97
Dimension des encoches, voir *fig.* 4.	
Surface de passage du flux s dans le deuxième entrefer pour un champ magnétique, en cm²	1790
Surface de passage du flux s'' pour un champ dans le troisième entrefer, en cm²	1537

Réluctance magnétique directe correspondant à la surface d'un pôle pour toute la machine. — Pour le calcul de la réaction directe, il faut déterminer la valeur de la réluctance que rencontre au passage, dans toute la machine, le flux correspondant à la surface d'un pôle.

Cette valeur est donnée par la formule suivante, qui est d'ailleurs évidente,

$$\mathcal{R} = \frac{e}{s} + \frac{e'}{s'} + \frac{e''}{s''} + \frac{A}{\mu\sigma},$$

dans laquelle e, e', e'' représentent les trois entrefers; s, s', s'' les sections de passage du flux pour un champ dans les trois entrefers.

La section s est la surface d'une protubérance polaire dans l'entrefer principal, elle correspond au flux d'un champ. Les sections s', s'' représentent le quotient des surfaces totales de passage du flux dans les entrefers e', e'', divisées par le nombre de champs ou de protubérances polaires. A et σ représentent la longueur et la section moyenne du circuit magnétique dans le fer.

En appliquant cette formule à la machine considérée, on trouve

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{690} + \frac{0,2}{1790} + \frac{0,2}{1537} = 0,0000400 + 0,0000183 = 0,00175.$$

Réluctance magnétique des fuites pour une encoche. — Cette réluctance est donnée par l'expression

$$r = \frac{2\varepsilon'}{\eta'} + \frac{\varepsilon}{\eta},$$

dans laquelle

r représente la valeur de cette réluctance pour l'unité de longueur de l'induit;
ε' la largeur de l'encoche;
η' sa hauteur;
ε la largeur de l'isthme;
η sa hauteur;

Appliquée à la machine considérée, la réluctance d'une encoche avec son isthme est égale à la valeur de r divisée par la longueur du fer doux suivant l'axe de la machine que nous appellerons b.

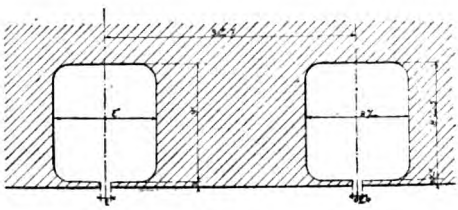


Fig. 4.

On a donc, pour la réluctance d'une encoche avec son isthme,

$$\frac{r}{b} = \frac{1}{24,3}\left(\frac{8}{4,5} + \frac{0,4}{0,2}\right) = 0,1554 \text{ (voir } \textit{fig.}\ 4).$$

Calcul de la réactance directe dans l'alternateur triphasé. — Nous avons représenté sur la *fig.* 5 un schéma qui donne les positions relatives des enroulements et des pôles aux deux positions de ces derniers. Les trois enroulements sont désignés par les chiffres I, II, III.

Dans la première position, le pôle est placé en regard de la phase I; dans la deuxième position, il est placé à 90° de cette phase, le mouvement étant dirigé comme l'indique la flèche.

Nous supposerons d'abord que le courant est entièrement déwatté dans l'induit, et nous appellerons I_d sa valeur efficace, sa valeur maxima étant donnée par $I_d\sqrt{2}$.

La valeur du flux inducteur, pour la phase I, étant maxima dans la première position du pôle, il est facile de voir que le courant déwatté est alors maximum dans la même phase; dans les phases II et III placées à 120° de la première, le courant est négatif et a pour valeur 0,5 de la valeur maxima $I_d\sqrt{2}$.

Dans ce qui va suivre nous appelons n le nombre de conducteurs passant par une encoche; le nombre de spires d'une bobine est donc également n.

A l'aide des valeurs du courant dans chaque phase il est facile d'évaluer la force magnétomotrice pour chacun des trois intervalles bc, cd et de qui séparent les encoches placées devant le pôle. Le flux de réaction étant direct, il se ferme pour toute la machine et il agit, pour chaque intervalle placé entre deux encoches, sur une réluctance totale, dont la valeur est $3\mathcal{R}$, c'est-à-dire le triple de la réluctance que nous avons calculée dans le paragraphe précédent.

En faisant la somme des forces magnétomotrices qui agissent devant le pôle dans les trois intervalles, il est facile de voir que les flux de réaction auxquels elles donnent naissance ont pour somme

$$4\pi n I_d\sqrt{2}\,\frac{2}{3\mathcal{R}}.$$

Au flux de réaction directe il est nécessaire d'ajouter le flux de fuites passant par les encoches et leurs isthmes et correspondant à une phase. Ce flux de fuites se ferme par les encoches b et e dont la réluctance a la valeur indiquée plus haut. Il faut y ajouter le flux de fuite qui se ferme autour de l'encoche dans l'entrefer, sans atteindre la pièce polaire. La réluctance de ce parcours est représentée par la valeur bien connue

$$\frac{b}{\pi}\,L_n\left(\frac{2e}{\varepsilon}\right).$$

L'ensemble de ces flux de fuites pour les deux encoches b et e et les entrefers correspondants a donc pour valeur :

$$4\pi n I_d \sqrt{2}\left[\frac{1}{r}+\frac{1}{\pi}L_n\left(\frac{2e}{\varepsilon}\right)\right]2b.$$

Les flux que nous venons de calculer ne constituent pas les seuls auxquels donne naissance le courant déwatté qui traverse l'induit. La surface de l'induit découverte entre les protubérances polaires produit un flux qui se ferme par les pièces polaires. Dans l'intervalle des encoches e et f, a et b, ce flux atteint la pièce polaire en suivant la ligne moyenne 1-2 qui est représentée par un arc de cercle, si l'on admet la théorie de Forbes. Le demi-intervalle f-g donne également naissance à un flux de cette nature.

Si l'on tient compte des valeurs des forces magnétomotrices, en supposant que la fermeture s'opère par des arcs de cercle, on remarque que le flux provenant de l'intervalle e-f achève son parcours par la pièce polaire et l'intervalle d-e. Il en est de même du flux provenant du demi-intervalle f-g qui se referme par c-d.

En appelant l, comme nous l'avons indiqué plus haut, la longueur d'un demi-champ, compté sur la périphérie de l'induit, on trouve, pour la valeur des flux passant par les côtés des pièces polaires,

$$4\pi n I_d \sqrt{2}\left(\frac{8l}{\pi l+24e}+\frac{16l}{5\pi l-48e}\right)b.$$

La somme des deux termes précédents donne

$$4\pi n I_d \sqrt{2}\left\{\left[\frac{1}{r}+\frac{1}{\pi}L_n\left(\frac{2e}{\varepsilon}\right)\right]2+\frac{8l}{\pi l+24e}+\frac{16l}{5\pi l+48e}\right\}b.$$

En divisant ce terme par $I_d\sqrt{2}$, auquel il est proportionnel, et en le multipliant par $\omega=\frac{2\pi}{T}$ et par N, qui est le nombre de spires dans un circuit triphasé pour toute la machine, on obtient en unités C. G. S. la valeur de la réactance correspondante ou bien en ohms si on la divise par 10^9.

Le même mode de calcul appliqué à l'expression qui donne le flux de réaction principal fait connaître en ohms la réactance qu'elle représente.

On peut écrire

$$\omega\lambda'_{\max} = \omega N \times 4\pi n \frac{2}{3\mathfrak{R}},$$

$$\omega s'_{\max} = \omega N \times 4\pi n \left\{ \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{\pi} L_n \left(\frac{2e}{\varepsilon} \right) \right] 2 + \frac{8l}{\pi l + 24e} + \frac{16l}{5\pi l + 48e} \right\} b.$$

On trouve ainsi

$$\omega\lambda'_{\max} = 314 \times 660 \times 12,56 \times 165 \times \frac{3}{3 \times 0,00175} \times \frac{1}{10^9} = 163,6 \text{ ohms},$$

$$\omega s'_{\max} = 314 \times 660 \times 12,56 \times 165 \left(1,781 + \frac{232}{115} + \frac{464}{503} \right) \frac{24,3}{10^9} = 49,4 \text{ ohms}.$$

Les termes précédents doivent être multipliés par un coefficient de réduction k correspondant à la force électromotrice produite par un enroulement polyphasé. Dans le cas étudié l'enroulement est à six encoches par champ, $k = 1$. La somme des deux réactances $\omega\lambda'$ et $\omega s'$ correspondant à la valeur maxima de la réactance totale en courant déwatté, est donc

$$\omega l'_{\max} = 162,6 \text{ ohms} + 49,4 \text{ ohms} = 213 \text{ ohms}.$$

Cette valeur maxima est celle qui correspond à la première, position du pôle dans le cas du courant déwatté.

Dans la deuxième position du pôle située à 90° de la première,

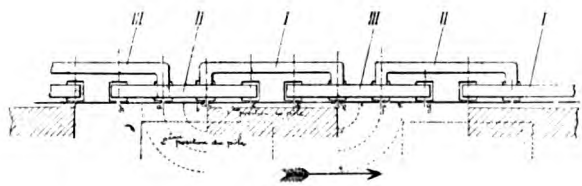


Fig. 5.

et visible sur la *fig.* 5, la valeur de cette réactance est minima, elle se calcule par les mêmes procédés.

Calcul de la réaction déwattée dans la position du minimum. — Dans la deuxième position du pôle (*fig.* 5), la valeur du courant déwatté est 0,866 de la valeur précédente; le flux principal de réaction a donc pour expression

$$\omega\lambda'_{\min} = \omega\lambda'_{\max} \times 0,866 = 163,6 \text{ ohms} \times 0,863 = 141,5 \text{ ohms}.$$

La valeur du flux de fuite par les encoches et l'entrefer autour des encoches reste la même; celle du flux qui se ferme par les côtés du pôle est un peu différente. Tout calcul fait, on trouve

$$\omega s'_{\min} = \omega N \times 4\pi n \left\{ \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{\pi} L_a \left(\frac{2e}{\varepsilon} \right) \right] 2 + \frac{8l}{\pi l + 12e} \right\} \times 0{,}866\, b = 36{,}5 \text{ ohms}.$$

La valeur minima de la réactance totale est donc

$$\omega l'_{\min} = 141{,}5 \text{ ohms} + 36{,}5 \text{ ohms} = 178 \text{ ohms}.$$

Lorsque l'alternateur est en fonctionnement, la valeur de la réactance directe oscille entre le maximum 213 ohms et le minimum 178 ohms. On n'est pas loin de la vérité, en estimant que la valeur moyenne de cette réactance est la moyenne arithmétique des valeurs extrêmes, soit donc 195 ohms en chiffres ronds.

Calcul de la réactance transverse ou wattée. — Le calcul de la réactance wattée, qui donne lieu à la réaction transverse, se fait encore en plaçant le pôle dans deux positions : l'une correspond au maximum et l'autre au minimum.

Calcul de la valeur maxima. — Le pôle est placé dans la deuxième position de la *fig.* 5; la première phase a un courant watté maximum et les deux autres phases ont un courant watté négatif de valeur $\frac{1}{2}$. Dans les intervalles des encoches placées sur le bord du pôle, *ha* et *cd*, il est facile de voir que les forces magnétomotrices sont de sens contraire; elles tendent donc à créer un flux de réaction se fermant par le pôle. Il en est de même des intervalles *ab* et *bc* qui se trouvent placés devant le pôle.

A l'aide des valeurs des forces magnétomotrices et des valeurs des réluctances, qui se réduisent à la double traversée de l'entrefer, on trouve que le flux de réaction principal a pour expression

$$4\pi n I_w \sqrt{2} \frac{S}{3e}.$$

Et comme $S = bl$, ce flux peut s'écrire

$$4\pi n I_w \sqrt{2} \frac{bl}{3e}.$$

Le flux de fuite par les encoches, les isthmes et leurs entrefers a la même valeur que dans le cas du courant déwatté, soit

$$4\pi n I_w \sqrt{2}\left[\frac{1}{r} + \frac{1}{\pi} L_n\left(\frac{2e}{\varepsilon}\right)\right] 2b.$$

Le flux passant par les côtés du pôle, calculé comme précédemment, a pour valeur

$$4\pi n I_w \sqrt{2}\left(\frac{l}{\pi l + be} + \frac{4l}{\pi l + 24e}\right).$$

La somme de ces deux dernières expressions s'écrit

$$4\pi n I_w \sqrt{2}\left\{\left[\frac{1}{r} + \frac{1}{\pi} L_n\left(\frac{2e}{E}\right) 2 + \frac{l}{\pi l + be} + \frac{4l}{\pi l + 24e}\right]\right\} b.$$

En remplaçant les lettres par les valeurs numériques indiquées plus haut, on trouve pour la réactance principale

$$\omega\lambda_{max} = 314 \times 660 \times 12,56 \times 165 \times \frac{24,3 \times 29}{3} \times \frac{1}{10^9} = 106 \text{ ohms}.$$

Pour la réactance due aux fuites

$$\omega s_{max} = 314 \times 660 \times 12,56 \times 165\left(1,781 \times \frac{29}{97} \times \frac{116}{113}\right) 24,3 \times \frac{1}{10^9} = 32,4 \text{ ohms};$$

d'où

$$\omega l_{max} = 104 \text{ ohms} + 32,4 \text{ ohms} = 136,4 \text{ ohms}.$$

Calcul dans la position du minimum. — La position du minimum de la self wattée correspond à la première position du pôle de la *fig.* 5; le courant dans la phase I est nul, dans les deux autres phases sa valeur est de 0,866 et il est de signes contraires.

La valeur du flux transverse principal est alors

$$4\pi n l_w \sqrt{2} \times 0,866 \times \frac{S}{3e} = 4\pi n I_w \sqrt{2} \times 0,866 \times \frac{bl}{3e}.$$

La valeur des flux de fuites par les encoches, les isthmes et leurs entrefers est de

$$4\pi n I_w \sqrt{2} \times 0,866\left[\frac{1}{r} + \frac{1}{\pi} L_n\left(\frac{2e}{\varepsilon}\right)\right] 2b.$$

La valeur des flux se fermant par les côtés du pôle, calculée

comme précédemment,

$$4\pi n I_w \sqrt{2} \times 0,866 \times \frac{4l}{\pi l + 12e} b.$$

Les valeurs des réactances correspondant à ces flux sont ainsi de

$$\omega\lambda_{\min} = 90,1 \text{ ohms}, \qquad \omega s_{\min} = 26,5 \text{ ohms};$$

d'où l'on déduit la valeur minima de la self qui est de

$$\omega l_{\min} = 90,1 \text{ ohms} + 26,5 \text{ ohms} = 116,6 \text{ ohms}.$$

La moyenne arithmétique des valeurs maxima et minima est donc

$$\omega l_{\text{moy}} = \frac{136,4 + 116,6}{2} = 126,5 \text{ ohms}.$$

Le calcul nous montre donc que, dans le type de machine étudié, la valeur moyenne des deux réactances en courant déwatté et en courant watté est complètement différente. Toute théorie basée sur l'égalité de ces deux réactances conduirait, pour la machine en question, à des résultats erronés.

On remarquera aussi que la valeur moyenne des réactances dues aux flux accessoires se fermant par les encoches et par l'entrefer ainsi que par les côtés du pôle, n'est pas la même en courant déwatté et en courant watté. Pour le courant déwatté, sa valeur est de 43 ohms; pour le courant watté, de 30 ohms. Cette différence vient de ce que les flux se fermant sur les côtés des pôles n'ont pas la même valeur lorsque le courant est watté ou déwatté.

Vérification expérimentale du calcul de la réaction directe. — La vérification du calcul de la réactance déwattée a été faite par la méthode Behn-Eschenburg, en mesurant le courant de court-circuit. La courbe de ces courants, en fonction des ampères-tours d'excitation, est portée sur la *fig.* 6, où se trouve indiquée la caractéristique à vide de la machine. On trouve ainsi que pour 8,25 ampères d'excitation le courant est de 8,8 ampères correspondant à une force électromotrice intérieure totale de 1700 volts par phase; pour 8,50 ampères d'excitation le courant passe à 9,10 ampères, avec une force électromotrice intérieure totale de

1760 volts. La résistance ohmique d'une phase étant de 16 ohms, il en résulte que la valeur de la réactance directe est de 195 ohms dans le premier cas et de 193 ohms dans le second.

En tenant compte des erreurs possibles des appareils de mesure, la concordance avec les résultats calculés peut être considérée comme satisfaisante, l'induction pour les valeurs indiquées de l'excitation étant de l'ordre de grandeur de l'induction en charge, et l'alternateur n'étant pas saturé.

Vérification de l'épure générale des deux réactions pour l'alternateur considéré. — La méthode de vérification a consisté à faire débiter l'alternateur, pour des excitations variables, sur des résistances extérieures sans décalage. On mesurait directement l'excitation, la tension aux bornes, le courant débité; la vitesse était maintenue invariable. L'alternateur étant à haute tension, le chiffre donné par le voltmètre à haute tension était contrôlé par un voltmètre à basse tension, alimenté par un transformateur en dérivation n'introduisant lui-même aucun décalage sensible.

Sur la *fig.* 6, à côté de la caractéristique à vide, nous avons tracé une seconde caractéristique, déduite par le calcul des tensions mesurées aux bornes.

En partant de la tension, mesurée aux bornes, du courant débité et de la valeur des deux réactances calculées plus haut, et en appliquant la formule générale, nous avons pu, en effet, déduire des valeurs expérimentales la valeur de la force électromotrice intérieure totale correspondant à chaque expérience. Les valeurs ainsi calculées de la force électromotrice intérieure totale ont été reportées sur la figure à côté de celle indiquée par l'expérience sur la caractéristique à vide.

Le Tableau suivant indique le résultat de la comparaison :

Tableau de comparaison pour la vérification de l'épure générale de la théorie des deux réactions.

EXCITATION.	INTENSITÉ I.	TENSION aux bornes U par phase.	RÉSISTANCE réduite des courants de Foucault f.	RÉSISTANCE ohmique par phase r (à chaud).	$r' = r + \rho$.	RÉSISTANCE extérieure $R = \frac{U}{I}$.	E calculé par la théorie des deux réactions.	E mesuré sur la caractéristique à vide.	DIFFÉRENCES.
Ampères.	Ampères.	Volts.	Ohms.	Ohms.	Ohms.	Ohms.	Volts.	Volts.	Pour 100.
11,2	3,98	2020	18	16	34	508	2276	2240	+ 1,6
14,8	4,71	2410	22	16	38	512	2730	2730	0
17,8	5,08	2640	25	16	41	520	3010	3020	— 0,3
20,0	5,35	2780	27	16	43	520	3170	3180	— 0,3
25,0	5,55	2900	29	16	45	523	3330	3380	— 1,5

La première colonne du Tableau donne le courant d'excitation; la seconde, le débit à haute tension; la troisième, la tension simple aux bornes, mesurée par phase. La quatrième colonne indique les valeurs de la résistance réduite correspondant aux courants de Foucault. Cette résistance réduite croît avec l'excitation. Nous l'avons mesurée expérimentalement en traçant la courbe de la tension aux bornes par un débit croissant, sur résistance extérieure sans induction, avec une excitation constante. La valeur de la tangente à l'origine de cette courbe, évaluée en ohms, représente la résistance réduite correspondant aux courants de Foucault. Les diverses valeurs ainsi obtenues pour les diverses excitations sont celles inscrites à la quatrième colonne. La cinquième colonne du Tableau indique la résistance ohmique d'un circuit de l'alternateur dans les conditions de l'expérience; c'est une valeur constante. La colonne suivante porte la somme

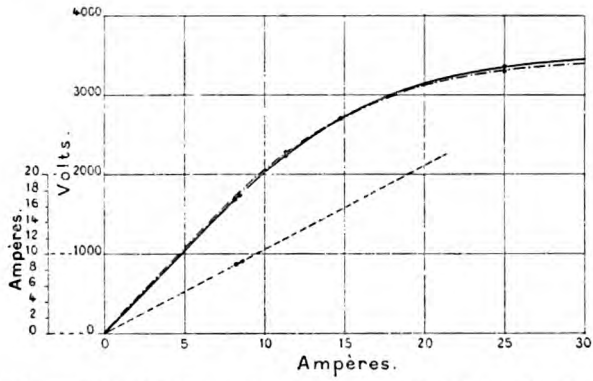


Fig. 6. — Caractéristique mesurée — Caractéristique calculée -·-·- Caractéristique de court-circuit -----

de ces deux résistances. La septième colonne donne la valeur de la résistance extérieure du circuit dans chaque expérience. Les deux colonnes suivantes indiquent la valeur de la force électromotrice intérieure totale : la première, celle obtenue par le calcul; la seconde, celle relevée sur la caractéristique. Enfin, la dernière colonne indique les différences par rapport à l'observation.

Il est facile de voir, soit par les chiffres, soit par l'inspection de la figure, que la valeur calculée de la force électromotrice intérieure totale est aussi satisfaisante qu'on peut le demander dans

des expériences qui nécessitent un si grand nombre de mesures.

La vérification de la théorie, dans le cas qui nous occupe, permet de lui accorder une grande confiance pour la prédétermination des constantes d'une machine. Nous ajouterons que si l'on était parti de l'ancienne théorie, en attribuant aux deux réactances la valeur résultant de la mesure en court-circuit, soit 195 ohms, le résultat obtenu aurait été différent. En prenant, par exemple, le débit de 5,55 ampères, le plus élevé du Tableau précédent, on trouve que la force électromotrice totale est donnée par la valeur

$$E^2 = (U + rI)^2 + (\omega l I)^2 = \overline{2989}^2 + (195 \times 5,55)^2,$$
$$E = 3170 \text{ volts},$$

tandis que la valeur mesurée sur la caractéristique est de 3380 volts; la prédétermination de la force électromotrice totale basée sur l'hypothèse de l'égalité des deux réactions donnerait donc une erreur par défaut de 6 pour 100, erreur qui serait beaucoup plus élevée dans le cas où l'alternateur débiterait sur réseau inductif.

SUR LE COMPOUNDAGE DES ALTERNATEURS;

PAR M. A. BLONDEL.

Première Partie.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.

En août 1896, l'auteur avait déjà proposé au Congrès de Genève de discuter l'opportunité du compoundage automatique des alternateurs; mais cette question avait éveillé peu de sympathie chez les constructeurs présents, qui affirmaient une préférence indiscutable pour les types d'alternateurs à faible réaction. L'intérêt qu'on porte aujourd'hui à ce sujet, et grâce auquel il a fait l'objet d'un des plus importants Rapports préliminaires du présent Congrès, montre que les idées ont progressé depuis cette époque et qu'on comprend désormais les avantages à espérer du compoundage, non pas tant pour la régulation que pour l'économie des matériaux dans la construction des alternateurs.

L'exposé général de la question ayant été présenté magistralement par mon savant ami M. Maurice Leblanc, l'un des initiateurs en matière de compoundage, je ne me propose pas ici d'y revenir, mais d'examiner, dans le cas d'un de ces systèmes que j'ai plus particulièrement étudié, l'influence de la loi de saturation du fer, dont il n'est malheureusement jamais parlé dans toutes les théories des divers compoundages décrits ou proposés. J'espère montrer que cet élément, loin d'être négligeable, joue souvent un rôle prépondérant, et gênant, dans les résultats obtenus.

Principe commun aux divers systèmes de compoundage. — On peut remarquer tout d'abord que, bien que très variées dans leurs dispositifs, les différentes méthodes de compoundage, depuis la plus ancienne due à Zipernowsky jusqu'aux plus modernes, dues à M. Maurice Leblanc, à M. Boucherot ou à l'auteur, etc., ont toutes un point commun dans le principe même qui leur donne naissance. Elles se proposent, pour maintenir la tension U aux bornes constante à toute charge (*fig.* 1), de faire varier le courant

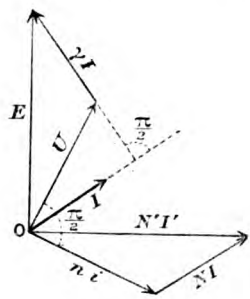


Fig. 1.

d'excitation proportionnellement à la *résultante* N' I' de deux vecteurs, représentant respectivement les ampères-tours inducteurs *ni* nécessaires pour produire la tension aux bornes U et les contre-ampères-tours NI équivalents à l'effet de la réaction d'induit de l'alternateur et de sa self-inductance. Si cette condition est remplie, l'excitation N' I' est, à chaque instant, ce qu'elle doit être pour produire, en dépit de la réaction NI, le nombre d'ampères-tours effectifs *ni* donnant naissance à la force électromotrice

apparente aux bornes U. C'est de cette proposition que partent tous les inventeurs de compoundages, y compris l'auteur de cette Note.

On suppose ainsi, il est vrai, que la réaction totale d'induit NI est proportionnelle au courant total débité, ce qui n'est pas toujours rigoureusement vrai, et que le coefficient d'Hopkinson c n'est pas modifié en charge, ce qui ne l'est pas davantage; mais on peut, au moins dans une première approximation, négliger ces effets secondaires et s'en tenir au principe représenté par notre figure.

Tout revient donc à faire agir aux bornes du circuit des inducteurs de l'alternateur deux forces électromotrices proportionnelles respectivement à U et à I et ayant même relation de phase et un rapport égal à $\frac{ni}{NI}$; seuls les moyens employés dans ce but diffèrent et peuvent être classés en deux catégories.

Première catégorie : *Excitation par une dynamo ordinaire.* — Les uns, comme l'auteur et M. Danielson, ajoutent dans l'induit d'une excitatrice ordinaire, d'excitation invariable et à calage invariable sur l'arbre, un enroulement parcouru par les courants I de l'alternateur et produisant sur le champ de cette excitatrice une réaction proportionnelle à NI; en pratique, ce qui est équivalent, ils transforment cette excitatrice en un convertisseur dont les bagues alternatives reçoivent le courant secondaire d'un transformateur ayant son primaire traversé par le courant I.

D'autres, comme M. Rice, font agir sur cette excitatrice-convertisseur deux transformateurs alimentés l'un en dérivation, l'autre en série.

Deuxième catégorie : *Excitation par des excitatrices spéciales à champ tournant.* — MM. Hutin et Leblanc [1] et M. Boucherot emploient des excitatrices spéciales, dont les inducteurs sont alimentés par des courants alternatifs, donnant naissance à

[1] Nous ne parlons que du plus récent système de MM. Hutin et Leblanc, car ils paraissent avoir abandonné leur premier, dont l'induit portait deux enroulements et rentrait plutôt dans la catégorie des convertisseurs. Il était du reste sujet à la même remarque que celle que nous allons faire.

des champs tournants, et dont les induits sont bobinés de façon à donner cependant des courants continus, dans certaines conditions de vitesse, relativement à la vitesse de l'alternateur. Le calage de l'excitatrice est également invariable. Dans le système Leblanc, il y a deux bobinages de champs inducteurs, l'un dérivé aux bornes de l'alternateur, l'autre en série avec le courant de celui-ci, avec ou sans interpositions de transformateurs. Dans le système Boucherot, il n'y a qu'un bobinage, mais alimenté par un courant résultant provenant d'une dérivation aux bornes de l'alternateur dans laquelle on intercale le secondaire d'un transformateur en série avec le courant.

On voit donc qu'au fond, à part les variétés de types de l'excitatrice, tous ces dispositifs sont bien de la même famille et peuvent faire à ce titre l'objet de critiques générales.

Indétermination possible du régime. — Une première remarque importante à faire, c'est que les systèmes fondés sur l'emploi de deux forces électromotrices dépendant *toutes deux* du régime de l'alternateur peuvent, au lieu d'assurer le compoundage, donner les résultats les plus discordants. On remarquera en effet que dans ces systèmes (Rice, Hutin-Leblanc, etc.) on produit dans l'excitatrice une force électromotrice E (*fig.* 2) proportionnelle à

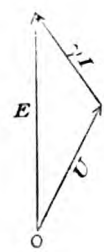


Fig. 2.

la résultante de la tension U aux bornes et d'une force électromotrice correspondante γI proportionnelle et de phase opposée au courant I. Quel que soit U, E prend la valeur convenable pour réaliser l'excitation nécessaire à cet U; toute variation de U se répercute sur E et inversement.

Si l'on suppose la force électromotrice de l'alternateur et celle de l'excitatrice simplement proportionnelles à leurs ampères-tours inducteurs, rien ne limite ces influences réciproques; *il y a donc, lorsqu'on travaille en dessous de la saturation, indétermination du régime de l'ensemble de l'alternateur et de l'excitatrice,* par excès de liaison entre les deux organes alternateur et excitatrice.

Des expériences, exécutées à ma connaissance par la maison Sautter-Harlé, ont démontré ce fait; car, en excitant un alternateur par un convertisseur alimenté par deux transformateurs, l'un en dérivation sur l'alternateur, l'autre en série, on a obtenu une grande infixité de la tension, qui rendait illusoire le compoundage.

Les mêmes expériences ont fait voir que, si l'indétermination n'était pas absolue, c'est que le régime était déterminé par un élément non apparent dans les théories publiées jusqu'ici : la saturation du fer dans les divers organes qui entrent dans la combinaison. Il en est de même dans les systèmes de M. Leblanc et M. Boucherot.

Dans son premier dispositif, M. Maurice Leblanc créait la stabilité (relative) *en saturant* le champ inducteur produit par le courant dérivé aux bornes de l'alternateur, mais au prix de notables pertes par hystérésis et Foucault, et d'un compoundage très imparfait.

Il en résulte les inconvénients qu'on signalera plus loin, en particulier la difficulté de relever la tension normale.

Il nous paraît préférable de laisser l'alternateur lui-même et les excitatrices travailler au-dessous de la saturation, de réduire autant que possible la dépendance entre l'alternateur et l'excitatrice et de donner une base fixe au compoundage, en remplaçant la force électromotrice prise en dérivation aux bornes de l'alternateur par une force électromotrice indépendante, convenablement choisie. On y gagne du reste en simplicité, puisqu'au lieu de deux inducteurs à l'excitatrice ou de deux transformateurs on n'en a qu'un.

Aussi ne voit-on plus qu'un seul transformateur dans le dispositif de la maison Sautter-Harlé, qu'on va décrire, et dans les derniers dispositifs de la *General Electric C°* dus à M. Rice jeune.

Il résulte de ces conditions générales que la théorie et le calcul

du compoundage doivent être faits en tenant compte de la loi de saturation du fer.

Influence de la loi de saturation du fer. — Cette influence se fait sentir non seulement dans les excitatrices du genre des dynamos, mais encore dans les autres, et même lorsqu'il semblerait que l'influence du fer soit négligeable devant l'entrefer. Elle peut être notable aussi dans les transformateurs interposés.

Il faut noter en effet que la loi de variation du magnétisme en fonction du courant excitant semble présenter une courbure plus rapide quand il s'agit des valeurs efficaces en courants alternatifs, que s'il s'agit des valeurs en courant continu (probablement à cause de l'hystérésis). Quoi qu'il en soit, le rapport des courants primaire et secondaire (ce dernier en court-circuit) n'est pas rigoureusement constant. La courbe ci-jointe (*fig.* 3), relevée par MM. Rey

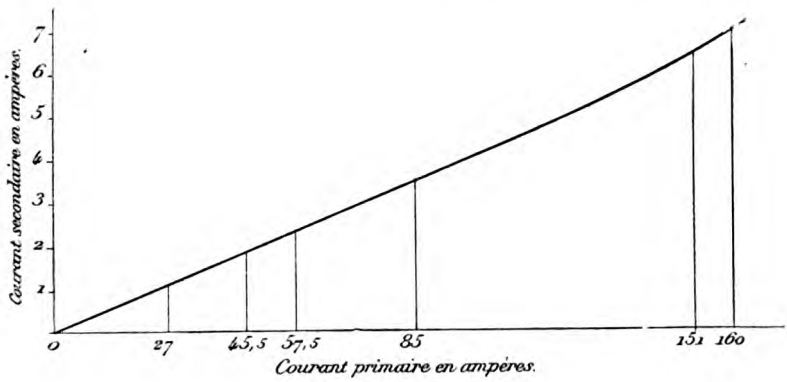


Fig. 3.

et Jigouzo sur un transformateur soumis à des forces électromotrices primaires croissantes, en donne un exemple; le rapport de transformation a varié de 22,25 à faible charge à 24,8 en pleine charge.

Cette courbure due à l'effet du transformateur (qu'on peut supprimer comme on le verra plus loin) s'ajoute ou s'oppose à la courbure produite par l'excitatrice; l'augmentation du v de l'alternateur avec les ampères-tours d'excitation ajoute encore un effet de même sens.

Ces faits expliquent pourquoi il est difficile de réaliser un parfait compoundage dans des limites un peu étendues, sans dos d'âne (1).

Ne pouvant, dans cette Note, aborder l'étude de tous les systèmes de compoundage à ce point de vue, je me bornerai à faire l'application de ces idées à la théorie du système le plus simple, fondé sur l'emploi d'excitatrices ordinaires à champ fixe, à excitation indépendante compoundée par application de courants polyphasés dans l'induit.

Deuxième Partie.

APPLICATION AU COMPOUNDAGE DES ALTERNATEURS PAR EXCITATRICE A CHAMP FIXE.

Principe du dispositif de l'auteur. — Dans le système que j'avais présenté antérieurement au Congrès des Électriciens de Genève (août 1896), le compoundage était produit simplement par une excitatrice, dans laquelle on fait passer les courants mêmes de l'alternateur. D'après le texte de cette présentation (2), la méthode « consiste dans l'emploi d'une excitatrice du genre Rechniewski à faible entrefer, dont les inducteurs, construits à la manière ordinaire, sont excités en dérivation juste assez pour produire l'excitation de l'alternateur fonctionnant à vide; l'induit, qui tourne synchroniquement avec l'alternateur par une commande mécanique, porte deux enroulements, un enroulement à courant continu, qui excite l'alternateur, et un enroulement compensateur semblable à celui de l'alternateur, et parcouru par les mêmes courants; on règle le nombre des spires et les points d'entrée de ce bobinage de façon que le champ de réaction produit par un courant déwatté ait la même direction que celui des inducteurs et le renforce exactement dans la même proportion que la réaction d'induit correspondante de l'alternateur tend à affaiblir le champ inducteur de celui-ci; en outre, on maintient le calage des balais invariable par un des artifices connus. Dans ces conditions, si les

(1) *Voir*, par exemple, les résultats publiés en 1899 par M. Maurice Leblanc dans le *Bulletin de la Société internationale des Électriciens.*

(2) *Note sur le courant déwatté* (*Éclairage électrique*, août 1896).

circuits magnétiques de l'alternateur et de l'excitatrice travaillent au-dessous du coude, il est facile de voir que l'on compense encore automatiquement toutes les réactions d'induit wattées ou déwattées. »

La *fig.* 4 représente schématiquement ce dispositif pour une

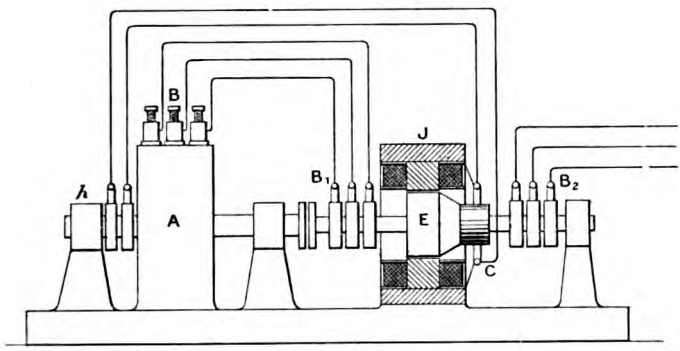


Fig. 4.

machine triphasée à inducteur tournant : A est l'alternateur, B les bornes de sortie des courants induits, B_1 les bornes d'entrée du circuit supplémentaire de l'induit de l'excitatrice E, B_2 les bornes de sortie, C le collecteur de l'enroulement principal de l'excitatrice, *b* les bornes du circuit inducteur de l'alternateur A, J les inducteurs de l'excitatrice excités en dérivation. La valeur pratique de cette méthode a été mise en relief par les applications qu'en a faites postérieurement M. Danielson.

Il va sans dire que le passage direct du courant de l'alternateur dans l'induit de l'excitatrice n'est pratique que pour des courants à basse tension et que, lorsque l'alternateur est à haute tension, on doit préalablement transformer le courant par un transformateur série, comme le faisait déjà en 1896 M. Maurice Leblanc dans son système de compoundage [1]. Moyennant la précaution indiquée plus loin, ces transformateurs donnent, sur un circuit secondaire invariable, un courant secondaire proportionnel au courant primaire.

---

[1] Le transformateur compoundeur a été d'ailleurs décrit bien antérieurement par Zipernowsky, Déri et Blathy.

Le dispositif devient alors celui de la *fig.* 5, où T_1 est le circuit primaire du transformateur triphasé placé en série sur le circuit principal et T_2 le secondaire. On remarquera que les trois bagues de droite B_2 ne servant qu'à fermer sur lui-même l'enroulement supplémentaire de l'induit qui reçoit les courants secondaires

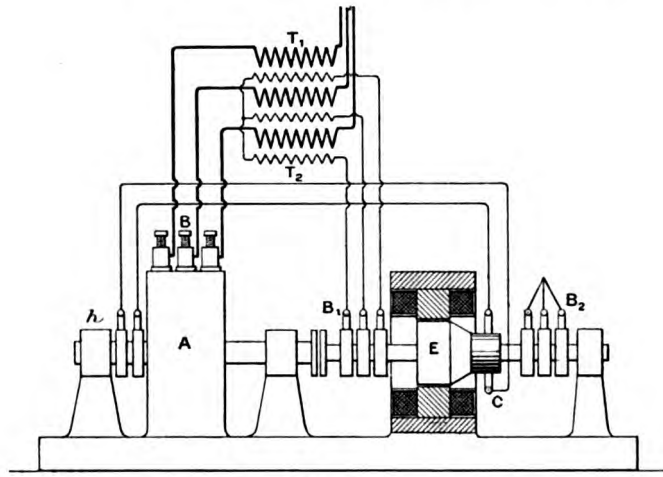


Fig. 5.

de T_2 par les bagues B_1, on peut donc les supprimer en faisant la jonction à l'intérieur comme d'habitude. En choisissant convenablement le nombre de spires secondaires T_2 du transformateur, on réunira en un seul les deux circuits de l'excitatrice comme on le fait pour les convertisseurs et comme nous le ferons désormais dans ce qui suit.

Toutes ces modifications, qui sont depuis quelque temps entrées dans la pratique des courants alternatifs, n'apportent aucun élément nouveau dans la méthode, et le dispositif de la *fig.* 4 n'est qu'une simple application du dispositif de la *fig.* 5 dont l'élément capital et nouveau en 1896 était l'emploi d'une excitatrice *entraînée rigidement* par l'alternateur sans variation de phase possible ni emprunt d'énergie notable au réseau.

Théorie du compoundage par l'excitatrice à champ fixe. — Dans le dispositif de la *fig.* 5, aussi bien que dans celui de la *fig.* 4, l'effet compoundant provient de la réaction magnétique de l'en-

roulement de l'induit de l'excitatrice sur le champ de cette excitatrice. Dans les deux cas, comme on l'a dit plus haut, les entrées des courants alternatifs provenant de l'alternateur, avec ou sans transformation préalable, doivent être disposées de façon que les courants déwattés produisent dans l'excitatrice un champ de réaction exactement en concordance avec le champ inducteur.

A ce propos, il est nécessaire de voir quel décalage introduit dans le cas de la *fig.* 5 le transformateur interposé. *Supposons d'abord que le courant débité par l'alternateur* A *soit pure-*

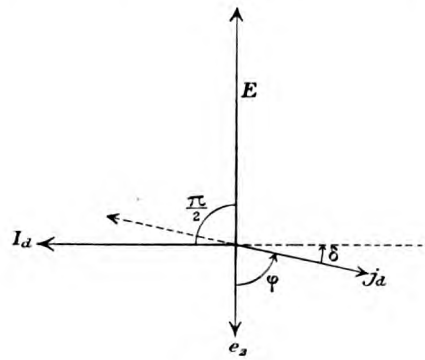


Fig. 6.

ment déwatté I_d, et que le secondaire T_2 du transformateur soit monté en étoile par exemple, de même que le primaire et que l'induit de l'alternateur. Le courant I_d (*fig.* 6) sera retardé de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à la force électromotrice intérieure E de ce dernier et donnera lieu dans T_2 à une force électromotrice secondaire e_2 décalée encore de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à I, par conséquent en opposition avec E. Cette force électromotrice e_2 agira dans le circuit de T_2 et de l'induit de l'excitatrice qui présente de la résistance r et beaucoup de réactance ωl, surtout à cause du circuit secondaire du transformateur qui en a beaucoup. Le courant magnétisant j_d produit par e_2 dans le circuit sera donc fortement décalé par rapport à e_2, mais l'angle de décalage φ, donné par la formule

$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{\omega l}{r},$$

sera toujours plus petit que $\frac{\pi}{2}$. Il en résulte que le courant j_d, au lieu d'être rigoureusement opposé à I_d, sera en avance d'un petit angle δ sur l'opposition.

Pour que son effet soit rigoureusement opposé à celui de I_d et soit aussi exactement magnétisant, on devra donc avancer les entrées de ce courant j_d dans l'induit d'excitatrice du même petit angle δ par rapport à la position théorique de connexion.

Enfin le courant j_d a pour valeur, en appelant Z l'impédance du circuit T_2E et M l'induction mutuelle du transformateur (que nous supposerons ici constante, *provisoirement* pour simplifier l'exposé),

$$j_d = -\omega \frac{MI_d}{Z};$$

il est donc bien proportionnel et opposé à I_d comme nous le disions plus haut.

Cela posé, supposons les connexions effectuées de façon que le courant j_d soit exactement déwatté en avance par rapport à la force électromotrice de l'excitatrice et par conséquent produise un effet purement magnétisant, il reste à calculer la valeur qu'il doit avoir pour compounder l'excitatrice ([1]).

L'effet de I_d, courant déwatté, dans l'alternateur est de produire

$$\frac{1}{2} K_A N_A I_d \sqrt{2}$$

ampères-tours démagnétisants (K_A étant un coefficient de construction et N_A le nombre de fils de l'induit par champ). L'excitatrice doit accroître le courant excitateur dans la même proportion en produisant $n_A i_A$ ampères-tours supplémentaires dans les inducteurs $n_A i_A = \frac{1}{\sqrt{2}} K_A N_A I_d$.

Si l'on appelle R la résistance totale du circuit de l'induit d'excitatrice et des conducteurs de l'alternateur, il faut donc que la force

---

([1]) Si le courant j_d est aussi opposé au courant I_d on fera les connexions de l'induit de l'excitatrice en des points opposés à celui de l'induit de l'alternateur. On peut aussi les faire en des points concordants, si l'on préfère, en retournant le courant par inversion des connexions des enroulements de T; on amène alors j_d à être de même sens que le courant primaire I.

électromotrice aux bornes du collecteur soit accrue automatiquement d'une quantité proportionnelle à I_d :

$$\Delta e = R i_A = \left(\frac{RK_A}{\sqrt{2}} \frac{N_A}{n_A}\right) I_d.$$

Le problème revient donc à calculer le courant j_d, lui-même proportionnel à I_d, nécessaire pour élever la force électromotrice en courant continu de l'excitatrice de la valeur e_0 qu'elle a à circuit ouvert à la valeur

$$e = e_0 + \Delta e,$$

ainsi calculée d'après les données de construction de l'alternateur.

Cette détermination, tout à fait analogue au calcul d'une dynamo hypercompoundée, se fait très facilement à l'aide de la représentation graphique des propriétés des dynamos; la seule différence c'est que l'effet magnétisant supplémentaire est produit non plus par un enroulement supplémentaire en série, mais par l'enroulement d'induit parcouru par le courant j_d.

Si l'on appelle K un coefficient de construction, relatif à l'induit de l'excitatrice, N le nombre de fils périphériques de cet induit par champ, les contre-ampères-tours équivalents à l'action du courant j_d peuvent se mettre sous la forme

$$\frac{1}{2} KN j_d \sqrt{2}.$$

L'effet magnétique de l'induit de l'excitatrice se trouve ainsi ramené au même mode d'évaluation que celui de son inducteur, et l'on peut aisément le déterminer par expérience en faisant *débiter* l'induit de l'excitatrice sur le transformateur, à vide, et comparant la chute de force électromotrice aux bornes avec le courant débité. On excite les inducteurs de E par une source extérieure, et l'on trace (*fig.* 7) deux courbes caractéristiques de l'induit, en fonction des ampères-tours excitateurs; la première I donne la force électromotrice aux bornes à circuit ouvert, la seconde II la force électromotrice aux bornes en circuit fermé sur le transformateur à vide; enfin, si l'on fait en même temps débiter l'excitatrice sur le circuit invariable des inducteurs de l'alternateur, on obtient une troisième courbe III qui représente la force

électromotrice aux bornes de l'induit excitant normalement l'alternateur quand celui-ci est à circuit ouvert.

La comparaison de ces courbes relevées expérimentalement ou déterminées par le calcul permet d'évaluer la réaction de l'induit.

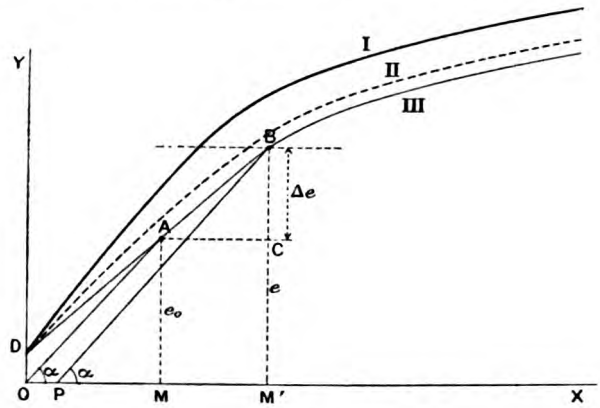


Fig. 7.

La courbe III caractérise le fonctionnement de l'excitatrice marchant sur les circuits extérieurs invariables. Nous allons déterminer les conditions d'excitation de l'excitatrice suivant ce qui précède.

On réglera l'excitation en dérivation de façon à obtenir la force électromotrice $MA = e_0$ nécessaire pour l'excitation de l'alternateur à circuit ouvert. Le nombre d'ampères-tours correspondant est donné par l'abscisse

$$OM = ni,$$

en appelant n le nombre de spires excitatrices en dérivation et i le courant dérivé. L'angle α a pour expression, en appelant r la résistance de la dérivation, ρ celle d'une seule spire, r_0 celle du rhéostat de réglage,

$$\operatorname{tang}\alpha = \frac{e_0}{ni} = \frac{e_0}{n\dfrac{e_0}{r}} = \frac{r}{n} = \frac{n\rho + r_0}{n}.$$

Si la résistance du rhéostat r_0 est négligeable, cette expression est sensiblement égale à

$$\operatorname{tang}\alpha = \rho, \qquad \text{résist. d'une spire,}$$

ce qui permet de déterminer immédiatement la section du fil à employer pour l'enroulement.

Supposons celui-ci exécuté et voyons ce qu'il faut pour réaliser la force électromotrice $e = e_0 + \Delta e$ à l'aide du courant j_d.

Soit $OM' = ni'$ l'abscisse correspondant à l'ordonnée $M'B = e$ et traçons par B une ligne BP parallèle à OA. Le segment PM', qui aura pour valeur

$$PM' = OM \frac{e}{e_0} = ni \frac{e}{e_0},$$

représentera les ampères-tours produits par le circuit d'excitation alimenté maintenant à la tension e au lieu de e_0. Ces ampères-tours sont insuffisants et il faut que la différence

$$OP = ni' - ni \frac{e}{e_0}$$

soit fournie par la réaction du courant d'induit j_d. D'où la condition

$$\frac{KN j_d \sqrt{2}}{2} = OP.$$

Cette équation détermine la valeur à donner à j_d, et l'on en déduira la valeur à donner à la force électromotrice secondaire du transformateur

$$e_2 = Z j_d = \frac{\overline{OP} \times Z\sqrt{2}}{KN},$$

et par suite le coefficient d'induction mutuelle de celui-ci

$$M = \frac{T}{2\pi} \frac{e_2}{I_d}.$$

Le coefficient Z, impédance du circuit secondaire, peut se déterminer expérimentalement en mesurant le courant j_0 débité à vide par l'excitatrice sur le circuit transformateur seul, une fois qu'on l'a excitée de façon à réaliser la force électromotrice à circuit ouvert. On a en effet sensiblement

$$Z = \frac{e_0}{j_0},$$

Quant à la résistance de ce circuit, elle s'obtient en mesurant successivement celle de l'induit et du transformateur.

On voit que le problème est bien analogue au compoundage d'une dynamo génératrice. Mais il serait ici bien peu pratique de faire travailler l'excitatrice au-dessus du coude, comme les dynamos compound, car les ampères-tours de réaction nécessaires OP seraient tout à fait exagérés, étant très supérieurs à ce qu'on demande pour une dynamo; or il est nécessaire que OP soit très petit pour que j_d ne soit pas exagéré. Il faut en outre pour que entre A et B Δe varie à peu près proportionnellement à j_d, que le segment de

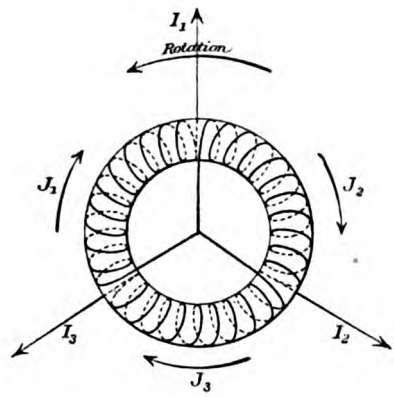


Fig. 8.

courbe AB soit sensiblement rapproché d'une droite. Il est donc préférable de travailler au-dessous du coude. Il faut avoir soin d'éviter le désamorçage dans ces conditions de marche; et la machine doit avoir un magnétisme rémanent (c'est-à-dire une ordonnée à l'origine OD) assez élevé. On reviendra du reste plus loin sur cette question de l'amorçage.

Réalisation des connexions aux bornes de l'induit d'excitatrice. — Pour établir les connexions avec l'excitatrice, il suffit de se reporter à la relation entre les courants des enroulements étoilés ou triangulaires des machines polyphasées, représentée graphiquement par la *fig.* 10 :

$$[\overline{I_1} = \overline{J_1} - \overline{J_2}],$$
$$[\overline{I_2} = \overline{J_2} - \overline{J_3}],$$
$$[\overline{I_3} = \overline{J_3} - \overline{J_1}],$$

les lettres J représentant les courants dans les enroulements en triangle de la *fig.* 9 et les lettres I les courants dans le circuit extérieur. En reportant les trois valeurs I à part (*fig.* 11) on voit,

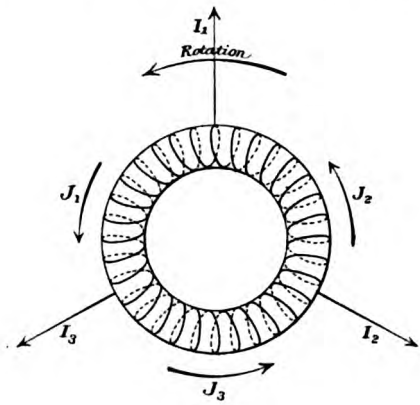


Fig. 9.

s'il s'agit d'un enroulement étoilé (*fig.* 8), que les courants I sont décalés par rapport aux courants J de 30° ou plus exactement de $\frac{1}{6}$ de pôle, suivant le sens positif de ces courants J. Pour les forces électromotrices l'acception des lettres de la *fig.* 10 devrait

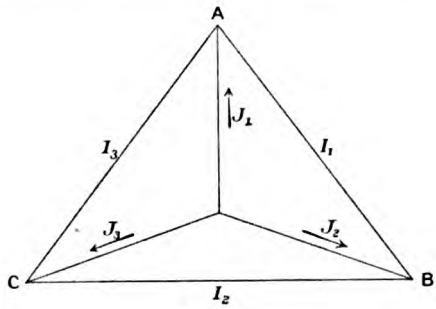


Fig. 10.

être inversée, les petits vecteurs se rapportant aux forces électromotrices polygonales entre fils deux à deux.

Nous supposerons d'abord pour simplifier qu'on veuille toujours compenser seulement les courants déwattés. S'il s'agit du montage de la *fig.* 4, l'enroulement supplémentaire de l'excitatrice est

formé de trois circuits étoilés (*fig.* 8); si l'enroulement de l'alternateur est monté en étoile (*fig.* 8), on cale l'excitatrice de façon que les enroulements de l'alternateur et de l'excitatrice soient

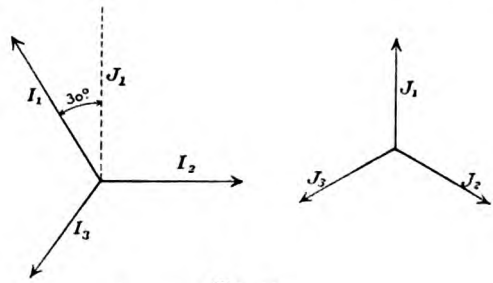


Fig. 11.

exactement en concordance de phase et on les oppose l'un à l'autre en réunissant deux à deux les bornes de l'alternateur aux bagues de même signe. Si l'enroulement de l'alternateur est monté en triangle, on part de la position précédente et l'on décale l'induit d'excitatrice de $\frac{1}{4}$ de pôle en avance.

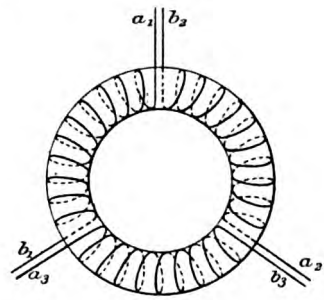


Fig. 12.

Les mêmes règles s'appliquent à la *fig.* 5, si l'on emploie un enroulement supplémentaire étoilé sur l'excitatrice et qu'on monte l'enroulement secondaire du transformateur de la même manière qu'est monté l'enroulement de l'alternateur; si l'excitatrice est connectée en triangle comme un convertisseur, on en tient compte par les raisonnements ci-dessus.

Fonctionnement en courant watté ou de phase quelconque. — La disposition précédente est insuffisante si l'on veut compounder

aussi en courant watté ou pour des décalages intermédiaires entre o et $\frac{\pi}{2}$. En effet, les courants wattés ne donnent lieu dans l'excitatrice ainsi calée et connectée qu'à une réaction transverse

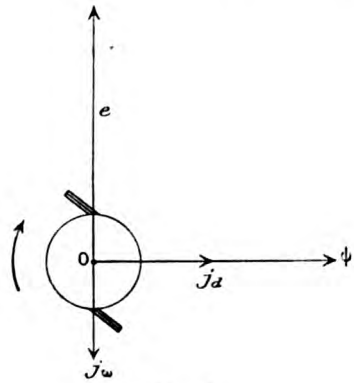


Fig. 13.

proportionnelle au courant j_ω (*fig.* 13) produisant de la distorsion du champ mais pas de modification sensible de la force élec-

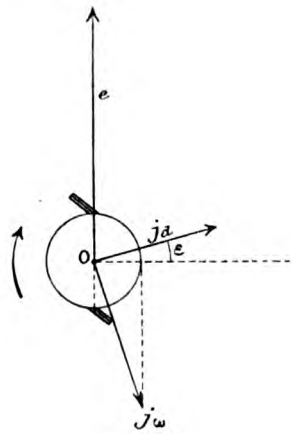


Fig. 14.

tromotrice induite. Or, il est des cas où il est désirable de relever automatiquement le voltage avec la charge, même pour des débits sur circuits non inductifs, par exemple pour compenser

la perte en ligne dans un transport d'énergie. Le moyen d'obtenir ce résultat est évident; il consiste à modifier le calage de l'induit de l'excitatrice de façon que les courants wattés qu'on y envoie par les bagues produisent, en outre de la réaction transverse, une réaction directe plus ou moins importante. Supposons que l'angle δ de la *fig.* 6 ait été corrigé ou soit négligeable; dans le calage normal de l'excitatrice les réactions dues aux courants j_d et j_ω de celle-ci ont la direction de la *fig.* 13 par rapport à celle de la force électromotrice induite de l'excitatrice e et du champ inducteur naturel φ; pour faire produire un renforcement de ce champ par le courant watté j_ω, il suffit de décaler les entrées des courants polyphasés ou l'induit de l'excitatrice par rapport à l'alternateur d'un certain angle supplémentaire ε (*fig.* 14). Le courant produisant la réaction directe devient alors, au lieu de j_d,

$$j_d \cos\varepsilon + j_\omega \sin\varepsilon = \frac{\omega M}{z}(I_d \cos\varepsilon + I_\omega \sin\varepsilon),$$

en appelant ω la vitesse de pulsation

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

On dispose de ε et de M (induction mutuelle du transformateur-série) et l'on peut, en les choisissant convenablement, obtenir un compoundage approximatif en vue de telles ou telles conditions données. La première condition, qui est de compenser complètement l'effet le plus important, dû au courant déwatté, détermine la valeur du produit $M \cos\varepsilon$; puis on détermine $M \sin\varepsilon$ par la condition de réaliser le voltage demandé à pleine charge dans les circonstances prévues.

Dans tout cela il s'agit, bien entendu, toujours de courants I_ω et I_d, watté et déwatté *par rapport à la force électromotrice* de l'alternateur, et non par rapport à la différence de potentiel aux bornes; aussi y a-t-il toujours une composante déwattée notable même en charge sur des lampes. C'est pourquoi la correction par le courant déwatté joue le rôle capital.

Cette solution, employée en particulier par la *General Electric C°*, pour n'être pas rigoureuse, n'en présente pas moins un caractère industriel et une approximation suffisante pour la pra-

tique. Il faut bien remarquer, du reste, qu'il importe bien moins d'avoir un réglage automatique parfait que de parer aux *grandes variations* de tension occasionnées par l'emploi d'alternateurs à forte réaction.

Amorçage de l'excitatrice. — L'amorçage de l'excitatrice ne présenterait aucune difficulté si l'on acceptait de faire travailler cette machine dans la région au-dessus du coude de la caractéristique, comme une dynamo compound ordinaire. Mais, comme on l'a dit plus haut, on n'aurait ainsi qu'un compoundage limité à 10 ou 12 pour 100 et qui ne s'appliquerait par conséquent qu'aux alternateurs ordinaires, du genre de ceux que l'on construit depuis quelques années, et non pas aux alternateurs à très forte réaction que l'on doit chercher à réaliser pour élever au maximum la puissance spécifique. D'autre part, le fonctionnement au-dessus du coude a l'inconvénient d'exiger un courant régulateur considérable à fournir par le transformateur.

Il est donc désirable de travailler au-dessous du coude, mais il est alors essentiel de proportionner la résistance électrique de l'excitatrice augmentée du circuit inducteur de l'alternateur et la réluctance magnétique de l'excitatrice de façon à satisfaire pour leur ensemble à la condition classique d'auto-excitation. Quand cette condition est remplie, la magnétisation de l'excitatrice est stable; sinon elle se désamorce. On peut, il est vrai, éviter le désamorçage complet par l'emploi d'un fort magnétisme rémanent ou d'une excitation séparée [1]; mais, tant que la condition d'auto-excitation n'est pas remplie, le champ tend toujours à prendre la

---

[1] Sur l'épure 7, si l'on ajoute du magnétisme rémanent ou une excitation fixe, telle que la force électromotrice initiale de l'excitatrice en circuit ouvert devienne plus grande, soit OD′ au lieu de OD, cela revient à déplacer l'axe des ordonnées en OY′ de façon qu'il coupe la caractéristique I à la hauteur Od — OD. La ligne d'excitation AS sera alors remplacée par une ligne moins inclinée AO′, et par conséquent on mettra moins de spires sur l'enroulement en série ou en dérivation. Par le point B on mènera la parallèle BN à AO′, et l'abscisse O′N indiquera les ampères-tours à fournir par le transformateur. On voit qu'ils seront plus grands que primitivement, mais encore acceptables.

A la limite, si l'on place le point D en A même, on supprimerait toute auto-excitation de l'excitatrice et laisserait toute l'excitation du champ à la charge des courants fournis par le transformateur, mais ce serait évidemment une solution déplorable.

valeur due à cette rémanence ou à l'excitation indépendante seule.

Emploi des transformateurs. — Nous avons supposé plus haut que l'interposition du transformateur donnait un courant secondaire proportionnel au courant primaire, grâce à la constance du coefficient d'induction mutuelle M. Mais en fait ce coefficient M n'est pas constant à cause de la variation de perméabilité du fer qui est très sensible entre la charge nulle et la pleine charge.

On peut essayer, pour la réduire, d'introduire dans le circuit magnétique un notable entrefer, mais c'est au détriment du rendement et de l'économie de l'appareil; il faut du reste un entrefer beaucoup plus grand qu'on ne le croirait *a priori* pour arriver au résultat cherché.

Un autre procédé consiste à donner au transformateur des nombres de spires très grands, assez élevés pour que, dans le circuit secondaire, la résistance et même l'inductance de l'induit de l'excitatrice soient négligeables devant la self-inductance du transformateur L_2. Celle-ci étant proportionnelle à la perméabilité aussi bien que l'induction mutuelle M, le courant proportionnel à leur rapport ne dépend plus de la perméabilité.

On a, en effet, d'après les expressions usuelles, en appelant N_1 et N_2 les nombres de spires primaires et secondaires, S la section du noyau, $\mathcal{R}$ la réluctance du circuit magnétique du transformateur

$$M = \frac{4\pi K N_1 N_2 S}{\mathcal{R}} \qquad \text{(C. G. S.)}$$

$$L = \frac{4\pi K' N_1^2 S}{\mathcal{R}}.$$

D'où l'expression j devient sensiblement, en posant $\frac{2\pi}{T} = \omega$ et en négligeant l'impédance de l'excitatrice devant celle du transformateur,

$$j = \frac{\omega M I}{\omega L} = I \frac{K N_2}{K' N_1} = \frac{N_2}{N_1} \frac{I}{1+a},$$

en désignant par a un coefficient de fuites magnétiques, d'ailleurs négligeable. On obtient donc bien la proportionnalité sensible de j à I, et l'expérience confirme ce fait (*fig.* 3).

Ces expressions permettent aussi d'évaluer le nombre de spires N_2 à adopter en fonction de l'induction $\mathfrak{B}$ admise et du courant j maximum nécessaire, car on peut écrire

$$j = \frac{\omega N_2 \mathfrak{B} S}{\sqrt{2}\,\omega L} = \frac{\mathfrak{B}\mathfrak{R} S}{4\sqrt{2}\,\pi K' N_2},$$

d'où l'on tire

$$N_2 = \frac{\mathfrak{B}\, l}{4\pi\mu K' j \sqrt{2}}.$$

en appelant l la longueur du circuit magnétique et μ sa perméabilité.

On connaît d'autre part *a priori* la section σ_2 qu'il faut donner au fil secondaire pour qu'il débite, sans échauffement exagéré, le courant j et l'on peut en déduire la section σ_1 du fil primaire par

$$\sigma_1 = \frac{N_2 \sigma}{N_1},$$

en vertu de la relation $N_1 I = N_2 j$.

On a d'autre part à satisfaire à la relation

$$\frac{K\omega N_2 \mathfrak{B} S}{2\sqrt{2}} = e_2.$$

en appelant e_2 la force électromotrice aux bagues de l'excitatrice en charge. On a donc tout ce qu'il faut pour dessiner le transformateur et modifier, s'il y a lieu, la valeur l prise comme point de départ.

Avant tout calcul, la carcasse du transformateur est d'ailleurs à peu près déterminée par sa puissance apparente

$$e_2 j.$$

Conclusions. — En résumé, l'exemple que nous venons de décrire montre bien que la question du compoundage des alternateurs ne peut être traitée complètement et pratiquement qu'en tenant compte :

1° Des conditions de stabilité du régime sous l'influence des réactions mutuelles de l'alternateur et de son excitatrice ;

2° De la variation de perméabilité du fer des divers organes d'une façon analogue à ce qu'on fait pour l'étude du compoundage des dynamos à courants continus.

On s'exposerait à de graves mécomptes en négligeant ces variations de perméabilité, comme dans les transformateurs et les moteurs synchrones.

Nous n'avons pas, du reste, la prétention d'avoir donné ici une théorie générale du compoundage, car le procédé étudié n'est pas absolument rigoureux et d'autres systèmes peuvent présenter des propriétés notablement différentes et théoriquement plus parfaites.

OBSERVATIONS ET MESURES RELATIVES AU FONCTIONNEMENT D'UNE GRANDE TRANSMISSION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE A HAUTE TENSION;

PAR M. GUIDO SEMENZA.

Il y a quelques mois, j'eus l'honneur d'accompagner un électricien allemand bien connu, dans une visite aux installations de *Paderno* et de *Milan*, et, en parlant des résultats pratiques obtenus avec les hautes tensions, il me disait :

« Bien que les installations à haute tension soient aujourd'hui très nombreuses, on sait très peu de choses sur les résultats obtenus dans la pratique. On voit que les lampes brûlent, les tramways circulent, les moteurs tournent; on voit que de temps en temps tout cela s'arrête puis recommence à marcher : mais c'est tout. Cette ignorance est due en grande partie à ce fait que, lorsque l'installation est mise en marche, elle est laissée entre les mains de gens qui n'ont pas le temps ou les moyens de faire des observations et de procéder à des mesures. D'autre part, il existe une quantité de gens qui ont peur de l'opinion publique et qui cachent très soigneusement les résultats dès qu'ils présentent quelque point défavorable. »

Et il ajoutait :

« Celui qui, se trouvant dans la position de pouvoir faire des mesures et des observations exactes, ferait connaître les résultats obtenus et la marche de l'installation, qu'elle soit régulière ou mauvaise, rendrait aux électriciens un très grand service. »

Le Rapport que j'ai l'honneur de vous présenter, Messieurs, est rédigé d'après les idées exprimées par mon illustre visiteur, et la rédaction m'en a été facilitée par la direction de la Compagnie Italienne Edison, à laquelle j'ai l'honneur d'appartenir. Cette Société qui, après avoir projeté et construit, exploite maintenant l'installation *Paderno-Milan,* et qui, avec une très grande largeur de vues, a toujours favorisé des études et des recherches même d'un caractère théorique, ne voit aucun inconvénient à ce que les résultats techniques obtenus soient portés à la connaissance du public.

Je vous rappellerai en deux mots les données de l'installation dont il s'agit.

La station hydro-électrique située à Paderno, sur l'Adda, fournit 10000 kw avec 7 unités de 1500 kw chacune (dont une de réserve) sous forme de courant triphasé directement de 12000 à 15000 volts à la fréquence de 42 périodes par seconde. Une ligne de 32800 m conduit cette énergie à Milan dans la station de P. Volta où la tension est réduite de 12500 à 3700 volts environ.

La distribution est faite dans la ville au moyen d'un réseau de câbles souterrains à 3700 volts; des sous-stations, au nombre de 100 environ, réduisent de nouveau la tension à 160 volts pour la distribution de force motrice et de lumière, tandis que, dans la partie centrale de la ville, des moteurs-dynamos convertissent le courant triphasé en courant continu pour l'éclairage et la traction électrique.

1500 kw à peu près sont absorbés par la traction : le restant est distribué pour la lumière et la force motrice.

Il s'agit donc d'une installation très complexe et qui offrait au moment des premières études, en 1896, plusieurs points sur lesquels les idées n'étaient pas encore bien claires.

Une chose qui se présentait comme tout à fait nouvelle, c'était l'alternateur à 15000 volts. Les machines pour des tensions si élevées n'existaient pas, même dans les laboratoires des ateliers, et plusieurs maisons ont nettement refusé de les construire.

On craignait pour les isolants, on se demandait si, avec le temps, les meilleures substances ne s'altéreraient pas, et surtout on avait peur de la nouveauté de la chose.

Les dynamos ont été fournies par la Maison Brown, Boveri et C°,

de Baden. L'isolement y est obtenu : dans le fer par des tubes en micanite de l'épaisseur de 6^{mm}, et à l'extérieur par l'air en tenant des distances suffisamment grandes.

Il y a presque deux ans que les premières de ces machines ont été mises en marche, et il faut remarquer que, pendant les essais et les premiers temps de l'exercice, elles ont dû, soit volontairement, soit accidentellement, subir des épreuves assez dures. Plusieurs courts-circuits se sont produits; et nous avons d'autre part fait des essais en poussant la tension de la machine jusqu'a 21 000 volts.

Malgré tout cela, deux accidents seulement sont arrivés à ces machines.

A deux époques très éloignées, deux machines différentes ont été atteintes par le même accident, sous la même forme et dans la même position : un arc se dégagea entre les trois premières bobines des trois phases qui sont placées dans la partie la plus basse de la machine.

L'espace d'air entre les bobines, dans les points les plus rapprochés, est d'environ 5 cm.

L'explication la plus facile et la plus commode de ce curieux accident serait de l'attribuer à une décharge atmosphérique : mais, dans les deux cas, le temps était tout à fait calme : dans le premier cas c'était en novembre, et je dois ajouter que sur la ligne en question on ne note jamais des décharges aux parafoudres, s'il n'y a pas un orage très violent.

Une autre explication serait d'admettre qu'un corps conducteur soit tombé dans la machine, mais on n'a rien trouvé qui puisse appuyer cette hypothèse.

Quoi qu'il en soit, ces accidents ne sont pas de nature à faire condamner l'usage de la tension à 15 000 volts, ni à donner des doutes sur la construction des machines.

J'ai, du reste, mes raisons pour croire que de semblables faits se sont produits ailleurs avec des tensions moins fortes, et sans qu'une explication complète puisse avoir été donnée.

La mise en parallèle et la marche simultanée des machines ne nous ont jamais donné aucun ennui : le couplage peut même être fait avec très grande facilité à vide, ce qui prouve que les régulateurs des turbines fonctionnent très bien. La répartition de la

charge se fait à l'aide de petits moteurs qui agissent sur les régulateurs et qui sont commandés du tableau. Il est intéressant de savoir que la marche en parallèle est tout aussi facile entre les alternateurs de Paderno et les alternateurs à vapeur qui se trouvent dans la station de P. Volta à Milan.

Il nous est arrivé souvent, pendant les travaux de complément de l'installation d'avoir à recourir à ces machines de Milan.

On les a toujours accouplées en parallèle avec celles de Paderno sans aucune difficulté; cette marche en parallèle de deux groupes de machines actionnées par des moteurs de nature différente et situées à 33 km de distance les unes des autres, était aussi régulière que si les machines étaient l'une à côté de l'autre dans la même station.

L'essai du rendement de ces machines a été exécuté en mesurant séparément les pertes.

Ces pertes en marche en pleine charge sont très sensiblement égales à 5 pour 100 et peuvent être décomposées comme suit :

	Pour cent.
Pertes par frottements et ventilation	1,25
Pertes dans le fer	2,50
Pertes dans le cuivre	1,15
Pertes dans l'excitatrice	0,10

A pleine charge de puissance absorbée et à $\cos\varphi = 0,8$, le rendement est environ de 94 pour 100.

La chute de tension a été trouvée un peu inférieure à 6 pour 100 à $\cos\varphi = 1$ et environ de 15,5 à $\cos\varphi = 0,8$.

Dans cette station, les excitatrices sont montées sur le même axe que les machines. Au début de l'exploitation, lorsque la charge était faible, cette disposition paraissait pouvoir présenter des difficultés pour le réglage; mais, avec l'accroissement de la charge, l'expérience a démontré que ces craintes étaient sans fondement.

Le tableau de la station génératrice a été construit avec des soins spéciaux, et il occupe, tout compris, un espace d'environ 160 m².

Dans l'établissement des plans de cette partie si délicate et si importante de la station, les constructeurs ainsi que les ingénieurs de la Compagnie, ont apporté les résultats de leur expé-

rience en grande partie acquise sur l'installation de Milan a 3600 volts. Et, à part quelques points dont je parlerai plus loin, on peut dire que cette étude n'a pas été sans résultats avantageux.

Les éléments les plus importants de tout tableau sont l'interrupteur et les plombs fusibles. L'interrupteur a obtenu un succès complet. L'interruption se fait à déclenchement rapide dans l'huile qui permet de couper un courant de 100 ampères à 15000 volts, sans que l'on aperçoive autre chose qu'une petite étincelle dans l'huile.

Les plombs fusibles n'ont pas donné aussi entière satisfaction. Le type employé est formé d'un tube ouvert aux deux extrémités dans lequel est tendu un fil en plomb.

Le fonctionnement de ces appareils n'a pas toujours été parfait; cependant je dois faire remarquer que, sur la ligne à 15000 volts, les accidents dus à cette cause ont été bien moins fréquents que sur le réseau à 3700 volts.

Ces plombs ont d'abord les défauts généraux communs à tous les appareils de ce genre, c'est-à-dire premièrement la difficulté de pouvoir les étalonner; en deuxième lieu, lorsque parfois ils partent tous ensemble, les vapeurs métalliques qui s'en dégagent conduisent l'arc soit d'un conducteur à l'autre, soit à la charpente du tableau, en causant des courts-circuits très sérieux.

Des cloisons et des parois en marbre sont très efficaces, mais ne donnent pas une sûreté complète.

Malgré cela, comme je l'ai dit, sur le tableau de Paderno ce cas s'est présenté très rarement. D'autres accidents sont arrivés à cause de fausses manœuvres. Il est aussi arrivé qu'une décharge atmosphérique perça un transformateur de voltmètre en portant la haute tension dans tout le groupe des appareils et instruments qui n'étaient pas construits pour la soutenir.

En général, les conséquences de ces accidents ont été d'une importance très réduite, et ceci est dû à la construction du tableau, qui est composé exclusivement de matières incombustibles : les rails collecteurs sont placés en bas et les appareils dangereux en haut, et la subdivision y est organisée de manière que chaque section puisse être isolée du service sans gêner en aucune manière le fonctionnement des autres.

Arrivons maintenant à la ligne qui est peut-être la partie la plus intéressante de l'installation.

Cette ligne comprend 18 fils de cuivre de 9 mm de diamètre, supportés par deux rangées de poteaux situées à une distance de 2 m l'une de l'autre. Chaque rangée porte 9 fils qui sont disposés sur les poteaux, de manière à occuper les sommets d'une série de triangles équilatéraux. On a donc ainsi, en pratique, une ligne double. L'utilité de cette disposition est très grande, car elle permet aux ouvriers de travailler sur une moitié de la ligne pendant que l'autre moitié est en service, et cela se fait couramment, sans le moindre danger.

Les poteaux sont en fer. On avait émis sur l'emploi des poteaux métalliques certains doutes et certaines craintes curieuses: on disait qu'il pouvait y avoir du danger pour les personnes qui toucheraient les poteaux; on craignait que la présence de ces corps magnétiques, dans le champ des fils, pût augmenter la self-induction de la ligne ou les pertes d'énergie.

D'un autre côté, la comparaison entre le coût d'amortissement d'une ligne en bois et celui d'une ligne en fer donnait en faveur du bois une différence qui ne compensait pas les avantages d'une ligne en fer, avantages constitués par une sûreté plus grande, et, comme conséquence du nombre plus petit de poteaux nécessaires, une réduction sur le nombre des isolateurs, ce qui constitue, d'une part, une économie, et, de l'autre, une diminution des points faibles de la ligne.

La pratique a démontré que le danger pour les personnes n'existe absolument pas, et que les autres craintes étaient tout à fait sans fondement.

La ligne, ainsi construite, présente une grande solidité et est vraiment une des plus belles que l'on connaisse.

Le poteau en fer a cependant aussi ses inconvénients, et surtout celui d'exiger un isolateur plus important. En effet, lorsqu'un isolateur se casse, le court-circuit à la terre est net, tandis qu'avec le poteau en bois il ne l'est pas nécessairement.

En vue de son importance, l'étude de l'isolateur a donc été faite avec des soins spéciaux. On commença par une série d'essais sur les types connus à l'aide d'un transformateur qui pouvait donner jusqu'à 50 000 volts. Ces essais, qui présentent une quan-

tité de phénomènes très intéressants, mais dont l'énumération

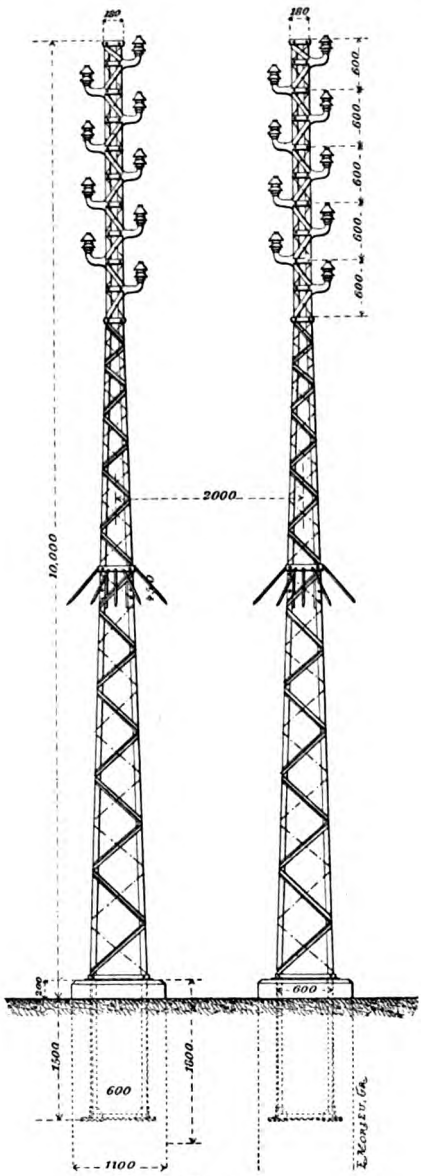


Fig. 1.

serait trop longue, nous ont conduits à la détermination des carac-

tères principaux et des dimensions qu'il fallait donner à l'isolateur dont nous avions besoin.

Dans les lignes à haute tension, le rôle des isolateurs n'est pas unique. La surface de porcelaine est presque toujours couverte de poussière et souvent mouillée par la pluie et les brouillards. Il se forme alors des dérivations de courant le long de la surface que constituent ce qu'on pourrait appeler des *dispersions superficielles*. Dans les isolateurs à cloches multiples employés pour les hautes tensions, ces dispersions sont tout à fait négligeables. En second lieu, la porcelaine est soumise à la tension électrique qui tend à la rompre et à la perforer. Il faut, pour cette raison, employer des épaisseurs suffisantes de porcelaine et avoir soin que la qualité de la porcelaine même soit excellente.

Enfin, pour l'effet d'une charge atmosphérique, la tension sur la ligne peut toucher des valeurs très élevées, de manière qu'une décharge saute directement du fil à la tige de fixation donnant lieu à ce qu'on peut appeler une *disruption*. Pour éviter ce danger, il faut étudier très bien la forme des cloches.

Dès le début nous avons écarté tous les types allemands, dans lesquels une série de petites cloches sont serrées l'une sur l'autre, sous la protection d'une grosse cloche très longue, qui porte son bord très près de la tige de fixation. Nous avons préféré les types américains, très ouverts et très larges. J'ai l'honneur de vous sou-

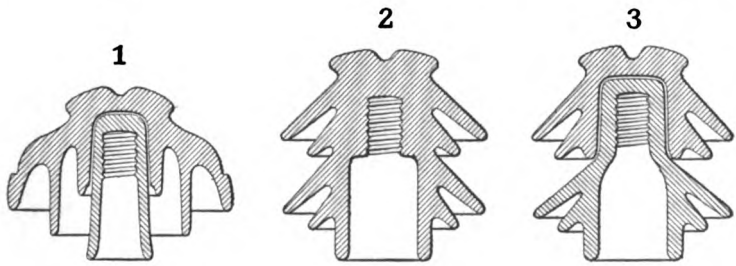


Fig. 2.

mettre les croquis des types que nous avons étudiés et qui ont été construits par la Maison Richard-Ginori, de Milan. Le premier, qui se rapproche assez des types américains, est composé de deux parties construites séparément; le deuxième représente ce que nous avons trouvé de mieux comme forme pour éviter des décharges

disruptives : le troisième a été établi d'après les résultats des observations faites pendant la première période d'exploitation et représente en somme la fusion de deux types en un seul : c'est la meilleure forme avec la composition en deux parties.

Voici les résultats pratiques que l'on a obtenus :

Type n° 1 : Isolateurs installés, 1750;
Isolateurs perforés par la tension, 0;
Isolateurs ayant laissé passer à l'extérieur une décharge atmosphérique, 3 en même temps.

Type n° 2 : Nombre d'isolateurs installés, 3 500;
Isolateurs perforés par la tension, 6;
Isolateurs ayant laissé passer à l'extérieur une décharge atmosphérique, 2.

Je reviendrai plus tard sur les effets des décharges atmosphériques.

La rupture des six isolateurs sous la tension est arrivée seulement dans les premiers mois de fonctionnement : il y a à peu près dix-huit mois qu'aucun accident semblable ne s'est produit.

C'est en constatant que le type en deux pièces n'avait jamais été perforé qu'on imagina le type n° 3.

Du reste nous voyons avec plaisir que l'on commence à prendre des brevets pour des types inspirés des mêmes principes, qui semblent entrer partout en faveur.

Une série assez complète de mesures a été effectuée sur la ligne pour en déterminer les constantes électriques et les conditions de fonctionnement. Les mesures de cette nature ne sont pas très faciles, en raison des grandes quantités d'énergie en jeu, et des hautes tensions sous lesquelles on travaille.

Une première partie de ces mesures se rapportait à la détermination de la charge et du décalage résultant.

Ces mesures ont été faites sur les rails collecteurs de la station transformatrice de Milan à la sortie des câbles du réseau à 3 700 volts.

A l'époque où ont été faites ces mesures on distribuait à Milan en totalité 3 930 kw.

Cette charge pouvait se diviser en quatre parties dont chacune avait un différent facteur de puissance ; à savoir :

1re *Partie*. — 827 kw. distribués dans la partie est de la Ville presque tout en moteurs asynchrones $\cos\varphi = 0,76$.

2e *Partie*. — 1 150 kw. distribués dans les mêmes conditions de charge dans la partie ouest de la Ville $\cos\varphi = 0,65$.

3e *Partie*. — 1 345 kw. absorbés par la Station des moteurs-générateurs pour la traction et la lumière à courant continu. Moteurs synchrones surexcités. Décalage en avant correspondant à $\cos\varphi = 0,83$.

4e *Partie*. — 608 kw. destinés à une industrie électro-chimique $\cos\varphi = 0,70$.

Les valeurs trouvées pour les deux parties de la Ville où la charge est presque exclusivement formée par des moteurs asynchrones peuvent causer quelque surprise. En effet, les constructeurs parlent toujours de 0,85, même 0,90 comme d'une chose garantie.

La Compagnie Edison a toujours été très sévère dans l'acceptation des moteurs sur son réseau, et une quantité d'essais ont donné des valeurs du facteur de puissance à pleine charge très satisfaisantes.

Mais, lorsqu'on vient dans la pratique, on trouve que le nombre de moteurs qui marchent à pleine charge est très restreint. Il faut aussi noter qu'à Milan la distribution est très subdivisée, de manière que les petits moteurs sont en majorité.

Il faut compter, enfin, sur une influence possible des transformateurs qui réduisent la tension de 3 700 à 160 volts. En effet, lors de l'exécution des essais, la puissance installée en transformateurs sur ces zones était à peu près le double de la puissance absorbée, de sorte qu'ils marchaient en moyenne à moitié charge, ce qui peut influencer la valeur du $\cos\varphi$.

En composant les différents courants avec leur décalage, on arrive à la valeur du décalage résultant sur le secondaire des transformateurs principaux; et le résultat est que le courant total est en retard de phase d'un angle correspondant à $\cos\varphi = 0,91$.

Voilà donc un cas dans lequel les moteurs synchrones surexcités jouent un rôle très important.

Il fallait, maintenant, tenir compte de l'influence des transfor-

mateurs principaux sur le décalage; par des analogies je crus devoir porter la valeur 0,91 à 0,89.

Construisons donc maintenant le diagramme de travail de la ligne.

Pour plus de simplicité, j'ai construit ce diagramme en le rapportant à un seul des fils de la ligne.

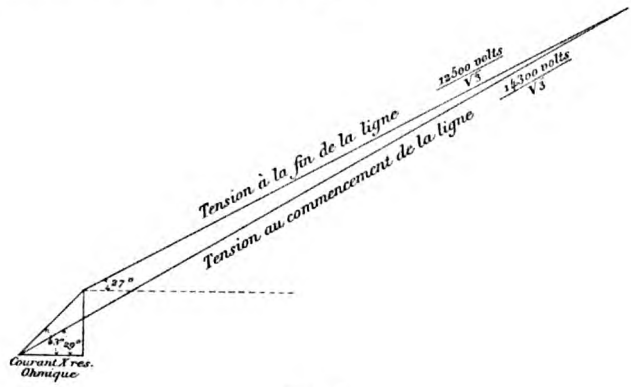


Fig. 3.

Les données nécessaires à établir le diagramme sont :

La tension au départ et la tension à l'arrivée, mesurées dans le même instant.

Le courant dans la ligne à ce même moment.

La résistance ohmique, qui a été très facilement mesurée.

Enfin la valeur de l'angle de décalage de la charge.

Vous avez ici, Messieurs, deux diagrammes : l'un qui représente les conditions réelles de travail, l'autre les conditions que l'on aurait si le cos φ était égal à 1.

Dans le premier cas nous avons :

Tension à la station régénératrice.....	14 300 volts
Tension à l'extrémité de la ligne.....	12 500 volts
Courant dans chaque fil.....	80 ampères

La résistance de chaque fil était, à ce moment, 9,6 ohms.

On en déduit :

Perte effective de tension : 1800 volts, c'est-à-dire 12,6 pour 100.

Perte en énergie dans chaque fil : 61 400 watts pour 587 000 watts transmis, c'est-à-dire 10,4 pour 100.

Rapport entre la perte effective de tension et la perte ohmique ri : 1,35.

Dans l'hypothèse de $\cos\varphi = 1$, les valeurs sont plus petites, c'est-à-dire :

Tension à la station génératrice.....	13650 volts
Tension à la fin de la ligne....	12500 volts
Courant dans chaque fil.....	64 ampères
Perte relative de tension.....	8,4 pour 100
Perte relative en énergie.....	7,9 pour 100

L'angle de décalage propre à la ligne résulte ainsi de 43°. Cet angle a été aussi mesuré directement par la méthode de la mise en court-circuit de la ligne, et l'on a trouvé environ 40°.

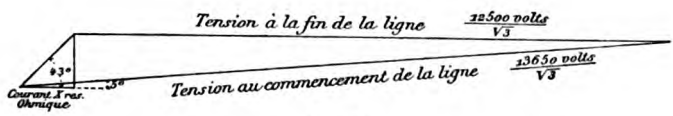


Fig. 4.

Je crois que, étant donnée la nature de ces mesures, ces deux résultats sont assez concordants.

On a exécuté aussi plusieurs mesures afin d'établir le courant de charge de la ligne, c'est-à-dire le courant absorbé sous la tension de travail par la ligne à circuit ouvert. On rencontre dans cette mesure une cause d'inexactitude qui donne aux résultats un caractère d'incertitude très marqué; le courant absorbé varie dans des proportions très larges, suivant la forme de la courbe du courant.

Des expériences successives répétées plusieurs fois en changeant la source de la force électromotrice ont donné des différences s'élevant jusqu'à 40 pour 100.

J'ai cru tout de même qu'il pouvait y avoir quelque intérêt à faire connaître les valeurs qu'on obtient en employant pour cet essai la tension de la station génératrice lorsqu'elle est chargée dans ses conditions normales.

Le courant absorbé était, sous 12500 volts à la fréquence de 42, de 1,03 ampère.

Mais il y avait une question à résoudre : s'agissait-il seulement

de capacité ou bien aussi de dispersion? en d'autres mots, quelles étaient la composante wattée et la dewattée de ce courant?

Voici comment j'ai pu séparer les deux éléments : j'ai placé en dérivation, entre deux des fils de la ligne, une résistance de lampes, et j'ai inséré trois ampèremètres comme suit : l'un mesurait le courant absorbé par la ligne, l'autre celui qui traversait les lampes, le troisième le courant résultant.

Ces trois courants constituaient un triangle, dans la représentation graphique, et, point important, le courant des lampes me permet d'établir la phase de la force électromotrice. Alors la composante du courant absorbé parallèle à la force électromotrice est la composante wattée, la normale à cette direction est la composante dewattée (due probablement entièrement à la capacité).

Les valeurs trouvées sont : pour la composante wattée : 0,240 ampère; pour la composante dewattée : 1,008 ampère.

Passons à l'exposé de quelques accidents de la ligne. J'ai déjà parlé des isolateurs. Dans deux des cas signalés, il est arrivé que l'arc formé entre le fil et la tige de support a duré assez pour fondre le fil et le briser.

Un morceau de bois lancé sur les fils y étant demeuré accroché, causa un court circuit.

Sur une passerelle de croisement d'une ligne de chemin de fer, les oiseaux ont causé deux contacts entre la masse de fer et les fils.

Enfin, nous avons eu les décharges atmosphériques. Les lignes sont protégées aux extrémités par des parafoudres Wurts installés exactement d'après les plans de l'inventeur, avec six bobines à self-induction et plusieurs séries de cylindres. Sur le parcours de la ligne, il y a sur trois des fils quelques groupes de parafoudres Siemens à cornes.

Les fils de terre des différentes phases sont munis de plaques de terre séparées.

Pendant l'année 1899, il y a eu environ 24 orages, dont une dizaine assez violents.

Jusqu'au 15 août de l'année présente, il y a eu 12 orages. Les interruptions de service dues aux orages, du commencement de l'exercice à ce jour, ont été au nombre de quatre, et, de ces quatre, deux seulement sont à attribuer au mauvais fonctionnement des

parafoudres, qui ont permis l'amorçage de l'arc. Après ces deux cas, qui sont arrivés l'année dernière, le nombre des espaces d'aire en série de chaque parafoudre Wurts qui était de 42 a été porté à 54 et, depuis, il n'y a plus eu d'inconvénients.

Une chose remarquable, c'est que sur cette ligne, qui traverse des zones presque dépourvues d'arbres de haute taille, dans lesquelles les orages sont assez violents et où la grêle fait des dévastations assez fréquentes, le nombre de décharges sur les parafoudres est très petit. Il est rare de compter pendant un orage plus de quatre à cinq décharges. Est-ce que le fait dépend des conditions locales? ou est-ce que peut-être les poteaux en fer jouent un rôle protecteur? ou plutôt est-ce que le fait n'est pas dû au type de parafoudres qui, en déchargeant lentement et continuellement, empêche l'accumulation des charges statiques?

Les parafoudres Siemens placés le long d'une des lignes ont aussi déchargé très bien plusieurs fois; mais leur décharge donne lieu à un abaissement de tension assez considérable, de manière qu'on peut toujours craindre qu'ils puissent provoquer le décrochage des moteurs synchrones.

Les deux autres accidents, dus à la foudre, sont d'une nature différente.

Pendant un orage, un grand arbre, placé à une vingtaine de mètres de notre ligne, a été foudroyé; dans le même moment, deux isolateurs de la ligne, les plus voisins de cet arbre, ont été cassés et perforés par une décharge entre les fils et le poteau.

Le deuxième cas est du même genre. Pendant un orage il y a eu une décharge d'une extrême violence entre nuages et terre.

Cette décharge a atteint simultanément six poteaux en bois d'une petite ligne télégraphique qui croisait notre ligne, mais il n'a été possible de trouver aucune trace de décharges directes sur nos fils ou nos poteaux. Malgré cela, nos fils ont déchargé sur les tiges de support : les décharges sautèrent extérieurement aux isolateurs et durent franchir un espace d'air de 10 cm au moins.

Dans les deux cas, qui semblent être de la même nature, on peut faire l'hypothèse qu'il s'agit d'un phénomène d'influence probablement d'un caractère oscillatoire.

Ces cas démontrent qu'une certaine exagération dans les dimensions des isolateurs n'est pas sans justification.

Il est naturel de se demander si, lorsqu'un défaut d'une ligne à haute tension est sur le point de se produire, il ne serait pas possible de le prévoir, de manière à retirer du service la partie endommagée et éviter de la sorte tout accident.

Je dois avouer, Messieurs, que je suis sur ce point-là un peu pessimiste.

En effet, le caractère des défauts dans les conduites à haute tension, c'est l'instantanéité; la phase plus violente de l'accident suit de très peu son commencement.

Le cas d'un défaut se présentant avec une progression lente est très rare; les indicateurs de terre peuvent alors rendre, et ils nous ont rendu, en effet, des services très remarquables.

Dans les autres cas, le court-circuit est tellement subit que les moteurs synchrones se décrochent et même les moteurs asynchrones s'arrêtent s'ils sont chargés. Alors chaque moteur devient un court-circuit, et la seule chose à faire c'est de couper l'excitation à la station.

Je sais que cela arrive également dans des installations où, au lieu de plombs fusibles ordinaires, on fait usage d'interrupteurs automatiques.

Pour en finir avec les accidents, c'est avec plaisir que je porte à votre connaissance que, soit dans la station génératrice, soit sur la ligne, aucun accident n'est jamais arrivé aux personnes.

Il peut arriver parfois que le téléphone, par son mauvais fonctionnement, cause des ennuis très sérieux. Des raisons d'économie et la commodité de la surveillance conduisent souvent à monter la ligne téléphonique sur les mêmes poteaux que les fils de transmission.

Très souvent il arrive, et il nous est arrivé au commencement de l'exploitation, que l'induction cause des bruits qui gênent et même rendent les communications impossibles. Le remède est très facile dès qu'on se rend compte de la véritable cause du dérangement. Et je crois pouvoir affirmer que les bruits gênants du téléphone sont causés par l'induction électrostatique; l'induction électromagnétique, au moins dans notre cas, ne donne pas d'ennui.

En effet, nos lignes de téléphone ne sont pas croisées ni placées en hélice; donc rien n'a été fait contre l'induction électromagné-

tique, et cependant on est arrivé à supprimer presque complètement les bruits gênants en isolant très soigneusement de la terre toutes les parties du circuit téléphonique même.

Il est intéressant de noter que ces lignes prennent, par induction électrostatique, une différence de potentiel à la terre d'environ 250 volts.

Comme je l'ai déjà dit, à l'extrémité de la ligne sont installés les transformateurs construits par la Maison Ganz; la puissance de chacun d'eux est de 350 kw ; ils sont refroidis par une ventilation artificielle. Des essais complets sur ces transformateurs n'ont pas encore été faits.

Sur le réseau de distribution, les sous-stations, etc., il y aurait encore beaucoup de choses intéressantes à observer, mais nous sortirions du sujet que je désirais vous soumettre.

En finissant cette Communication, je crois, Messieurs, pouvoir affirmer que les résultats donnés pour l'installation de Paderno sont de nature à rassurer les praticiens sur l'emploi des hautes tensions.

Ils démontrent, en effet, qu'une installation à 15000 volts peut être exploitée avec la même facilité et avec la même sûreté de fonctionnement que les installations à tension plus basse qui sont désormais devenues familières aux électriciens.

DE L'ACCOUPLEMENT DES ALTERNATEURS AU POINT DE VUE DES HARMONIQUES, ET EFFET DES MOTEURS SYNCHRONES SUR CEUX-CI;

PAR M. A. PEROT.

La question des harmoniques dans l'emploi du courant alternatif prend une importance de plus en plus grande, à mesure que les distributions par câbles se répandent, introduisant ainsi dans les circuits des capacités qui peuvent être assez élevées pour que les phénomènes de résonance tendent à se produire pour certains harmoniques.

L'origine de ceux-ci tient à ce que la variation de flux dans les bobines induites n'est pas sinusoïdale; on peut les séparer en

deux groupes pour les alternateurs habituels à induit denté, à enroulement non progressif. D'abord, ceux qui existeraient si l'induit était lisse, qui ne tiennent qu'à la forme des pièces polaires et à l'entrefer, ils ne sont en général pas dangereux, leur action est de transformer la sinusoïde en une courbe aplatie ou surélevée, ne présentant pas de maxima et de minima secondaires. Puis ceux qui viennent de la denture de l'induit, produits par la variation brusque de flux résultant du fait qu'une dent échappe à la pièce polaire ou est introduite dans le circuit magnétique. Ces derniers sont des plus dangereux car ils ont souvent une amplitude incomparablement plus grande que les premiers. C'est de ceux-ci seuls que je m'occuperai.

Quelle qu'elle soit la force électromotrice d'un alternateur peut être représentée d'après le théorème de Fourier par l'expression

$$e = E_1 \sin \omega t + E_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \ldots + E_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

Supposons que nous ayons associé en parallèle avec cette machine un autre alternateur par exemple, dont la self-induction soit la même L et dont la force électromotrice soit donnée par la même expression, l'harmonique d'ordre n étant seul différent, n'existant pas pour cette machine par exemple. Alors le circuit formé par les deux machines va être soumis à la force électromotrice $e_n = E_n \sin(n\omega t + q_n)$ et sera parcouru par un courant donné par

$$e_n = 2L\frac{di_n}{dt},$$

en négligeant les résistances ohmiques et supposant que l'ensemble ne débite pas; la différence de potentiel entre les points A et B, bornes communes des deux machines, due à cet harmonique sera

$$L\frac{di_n}{dt} = \frac{e_n}{2},$$

de sorte que tout se passera comme si la force électromotrice de l'harmonique était divisée par 2. L'harmonique est fermé sur l'ensemble des deux machines.

Dans le cas plus général où trois machines pour lesquelles un harmonique a les forces électromotrices e', e'', e''' et où le courant

sur le circuit extérieur est i les équations s'écriront simplement

$$e' - L\frac{di'}{dt} = e'' - L\frac{di''}{dt} = e''' - L\frac{di'''}{dt} = h,$$

$$i' + i'' + i''' = i,$$

d'où

$$L\frac{di'}{dt} = e' - h \qquad L\frac{di''}{dt} = e'' - h \qquad L - \frac{di'''}{dt} = e''' - h,$$

et

$$L\frac{di}{dt} = e' + e'' + e''' - 3h,$$

$$h = \frac{e' + e'' + e'''}{3} - \frac{L}{3}\frac{di}{dt},$$

expression qu'il est facile de discuter et qui montre que, dans le cas où l'harmonique n'existe que dans une machine, la différence de potentiel qui lui correspond est fortement abaissée par les deux autres.

D'autre part, en général, dans une installation, le service des câbles est en fonction bien avant qu'on ait procédé au couplage des machines; ce moyen de détruire l'effet nuisible des harmoniques est donc illusoire; mais un autre nous est fourni immédiatement si nous remarquons qu'au point de vue qui nous occupe un moteur synchrone marchant à vide et convenablement excité ne diffère en rien d'un alternateur couplé, si l'on fait abstraction des pertes; il doit donc produire le même effet.

Soient en effet L la self de l'alternateur, l celle du moteur, e' la force électromotrice de l'harmonique qui existe pour la machine et n'existe pas pour le moteur. Les équations seront

$$h = e' - L\frac{di'}{dt},$$

$$h = l\frac{di'}{dt},$$

$$h\left(1 + \frac{L}{l}\right) = e' = e'\frac{l}{L + l}.$$

Si l est petit vis-à-vis de L, condition qui pourra être réalisée en consentant une dépense d'excitation un peu élevée, l'harmonique sera étouffé, et si le moteur est à enroulement progressif comme une commutatrice par exemple, il imposera en quelque sorte sa force électromotrice sinusoïdale à l'alternateur.

Ce résultat a été vérifié sur des machines de très grande puissance, la force électromotrice d'un harmonique qui était avec la mise en circuit de câbles de 8,5 pour 100 tombait à 3 pour 100 par la mise en marche d'un moteur synchrone.

La force électromotrice de la machine est d'ailleurs profondément modifiée, car tandis que pour un alternateur seul le rapport de la tension maximum à celle qu'indique un voltmètre thermique est 1,65, il s'abaisse à 1,436; voisine de $\sqrt{2}$ par la mise en marche de deux moteurs synchrones, la force électromotrice se rapproche nettement de la sinusoïde.

L'effet d'un moteur asynchrone serait sans doute du même genre, car un tel appareil peut être regardé comme un transformateur à secondaire ouvert pour les courants dont la fréquence est la vitesse de rotation du rotor, et comme un transformateur à secondaire en court-circuit pour les autres fréquences, c'est-à-dire comme un appareil à faible self-induction, ce qui est la condition voulue pour que l'amortissement des harmoniques se produise.

Enfin il me semble qu'il serait facile d'éviter les harmoniques en faisant en sorte que les génératrices de l'induit et les bords des pièces polaires ne soient pas parallèles; le flux ne varierait plus brusquement mais progressivement; les tôles des pièces polaires devraient être découpées en deux fois. Toute forme telle que la forme ovale présentant une tangente parallèle aux génératrices d'induit doit être inférieure à une forme droite nettement inclinée sur les rainures d'induit.

Un mot encore au point de vue du rendement : les harmoniques donnent lieu à des courants d'échange entre les alternateurs et les moteurs qui absorberont de l'énergie dès que de la résistance ohmique sera en jeu. Il est à ce point de vue toujours avantageux de les étouffer avant la ligne.

THÉORIE GRAPHIQUE DE LA RÉGULATION DES CONVERTISSEURS ROTATIFS;

PAR M. A. BLONDEL.

INTRODUCTION. — On a beaucoup écrit et publié depuis deux ou trois ans sur les convertisseurs destinés à transformer les courants alternatifs polyphasés en courants continus ou inversement (2).

Mais on n'a pas donné de procédé purement graphique, et cependant complet, de traiter la question si complexe, et en même temps si attrayante, de la régulation de la tension de ces convertisseurs. Le but de cette Note est de combler cette lacune et de rattacher en même temps la solution de ce problème des convertisseurs à celle que j'ai précédemment donnée du problème des moteurs synchrones (3) et à ma *Théorie des deux réactions d'induit* dans les alternateurs.

Grâce à celle-ci, en effet, le convertisseur rotatif peut être traité comme un simple cas particulier des moteurs synchrones. *le moteur synchrone à réaction transversale nulle,* et les graphiques établis pour ces moteurs s'appliquent par la simple suppression du vecteur de réaction transverse (4).

On voit ainsi que cette théorie n'a rien d'artificiel, comme on pourrait le croire, et qu'elle présente au contraire une généralité et une homogénéité utiles en électrotechnique.

Notations. — Les notations seront sensiblement les mêmes que pour les moteurs synchrones; mais nous devons modifier un peu la signification des indices pour tenir compte de ce que l'induit du convertisseur reçoit des courants de deux espèces, primaires et secondaires. (Les enroulements primaire et secondaire peuvent être différents.) Nous conserverons des notations corres-

---

(2) Il suffit de rappeler les mémoires de MM. S.-P. Thompson, Steinmetz, Kapp, Woodbridge et Child, de Marchéna (particulièrement intéressant), Scott, etc., et les intéressantes publications de MM. Guilbert, Ritter, Janet, etc., sur divers points de la construction ou de la théorie de ces machines.

(3) L'*Éclairage Électrique,* t. XXVII. 22 juin 1901, p. 429.

(4) Désigné par A_2B sur nos précédentes figures de l'*Éclairage Electrique,* t. XXVII, p. 431.

pondantes à celles de la théorie des moteurs synchrones; nous appellerons donc

T la période, $\omega = \frac{2\pi}{T}$, la vitesse de pulsation;

R la résistance totale du circuit [génératrice, ligne [1] et bobinage primaire du convertisseur];

l la self-inductance cumulée de la génératrice et de la ligne;

s la self-inductance du convertisseur due aux fuites magnétiques de l'induit;

L la self-inductance ajoutée sous forme de bobines de réactance;

$X = \omega (L + l + s)$, la réactance totale du circuit alternatif;

$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, l'impédance totale correspondante;

E la force électromotrice efficace agissante, c'est-à-dire débitée par le réseau, ou induite dans la génératrice s'il s'agit d'un simple transport. Elle est supposée invariable, sauf avis contraire;

q le nombre de phases des courants primaires;

$\mathcal{E}$ la force électromotrice efficace primaire (alternative) du convertisseur;

$\frac{\mathcal{E}}{\xi}$ ou E_2 la force électromotrice induite secondaire (continue);

ξ le rapport de transformation du convertisseur;

I l'intensité efficace d'un des courants alternatifs primaires;

I_w ou J, sa composante wattée; I_d sa composante déwattée;

φ le déphasage $\left(\operatorname{tang} \varphi = \frac{I_d}{I_w}\right)$;

θ l'angle de phase entre les forces électromotrices $\mathcal{E}$ et E;

I_2 le courant continu secondaire, proportionnel à J diminué des pertes;

N le nombre des fils périphériques primaires par champ;

K un coefficient de réduction de cet enroulement;

N_2 le nombres des fils périphériques secondaires par champ;

A le nombre d'ampères-tours des inducteurs;

n le nombre de spires excitatrices de l'enroulement série;

r la résistance d'une spire de l'enroulement shunt;

j_0 le courant watté à vide, et i_0 le courant déwatté à vide.

---

[1] La résistance de la génératrice et de la ligne sont négligeables si le convertisseur est branché sur un grand réseau de distribution.

Même remarque pour la réactance.

Généralités. — *Réduction des réactions d'induit à la réaction directe seule.* — Le champ inducteur est la résultante de trois forces magnétomotrices (*fig.* 1).

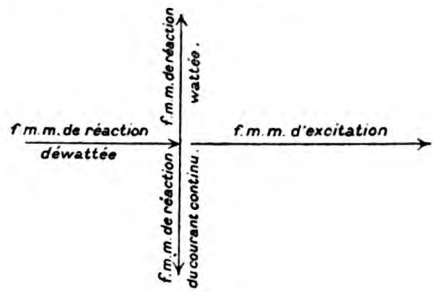


Fig. 1.

1° Les ampères-tours inducteurs du courant excitateur ;

2° Les ampères-tours déwattés par rapport à la force électromotrice, qui agissent de même que les précédents ;

3° La différence entre les ampères-tours wattés et les ampères-tours secondaires produits par le courant continu. Tous deux tendent en effet à produire des champs directement opposés entre eux et décalés de $\frac{\pi}{2}$ par rapport au champ excitateur.

Une très grande simplification résulte en pratique du fait que les ampères-tours wattés et les ampères-tours continus sont sensiblement égaux à toute charge.

En effet, l'enroulement étant un bobinage continu, le nombre d'ampères-tours wattés moyen est donné par la formule

$$K \frac{N}{2} I_w \sqrt{2},$$

N étant le nombre de *fils* et K le coefficient de réduction dû au chevauchement des enroulements pour un nombre d'encoches pratiquement infini. J'ai donné ailleurs des valeurs moyennes de ce coefficient, qu'il vaut mieux du reste déterminer empiriquement sur des machines existantes.

Le nombre d'ampères-tours moyen du courant continu débité I_2 est, d'autre part, la moyenne pour un champ

$$\frac{1}{2} \frac{N}{2} \left(\frac{I_2}{2}\right).$$

D'où le rapport du nombre d'ampères-tours secondaire et primaire

$$\zeta = \frac{1}{4K\sqrt{2}}\frac{I_2}{I_w}.$$

Quel que soit le nombre de phases q, si le rendement est supposé égal à l'unité, l'égalité des puissances primaire et secondaire donne, en se rappelant l'expression de la force électromotrice induite, en fonction du coefficient de réduction k dû au chevauchement,

$$I_w \frac{2\pi k}{2\sqrt{2}}\frac{N\Phi}{T} = I_2 \frac{N\Phi}{T}.$$

D'où

$$\frac{I_2}{I_w} = \frac{\pi k}{\sqrt{2}} \qquad \text{et} \qquad \zeta = \frac{\pi}{8}\frac{k}{K}.$$

Or, comme je l'ai également montré ailleurs [1], le rapport $\frac{k}{K}$ est égal sensiblement à $\left(\frac{\pi}{2}\right)^2$. On a donc :

$$\zeta = \frac{\pi}{8}\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 = \frac{\pi^3}{32} = \frac{30,95}{32},$$

chiffre qui est sensiblement égal à l'unité. La réaction transversale est donc absolument négligeable en présence de la réaction directe, et l'on est en droit de traiter les convertisseurs comme des appareils n'ayant que de la réaction directe.

Si l'on tient compte des pertes de rendement, soit 10 à 15 pour 100 de la pleine charge, cette égalité n'est plus aussi rigoureuse, mais :

1° La force électromotrice du courant continu ne subit aucune modification du fait de la réaction transverse, car les balais restent toujours rigoureusement à la ligne neutre, et, par suite, le flux direct est seul coupé ;

2° La force électromotrice du courant alternatif n'est modifiée que d'une façon insignifiante, car le champ résultant du courant watté I_w et d'un courant continu I_2 plus faible de 15 pour 100 ne constitue que 15 pour 100 du champ transverse de réaction de

---

[1] *Propriété des champs magnétiques tournants* (*Éclairage électrique*, 1895).

l'induit en courant continu, champ qui, en général, ne dépasserait pas la moitié du champ direct. Mais en admettant même que ce champ transversal résultant atteigne 20 pour 100 du champ direct, la force électromotrice alternative ne se trouverait renforcée que dans le rapport $\frac{\sqrt{1+(0,20^2)}}{1} = 1,02$, soit de 2 pour 100, ce qui est négligeable.

On est donc bien en droit de traiter, avec les précédents auteurs, le convertisseur comme un moteur synchrone à réaction transversale nulle. Il ne pourrait y avoir d'exception que pour les convertisseurs sans excitation. Mais ceux-ci ne sont presque pas employés et leur théorie peut se faire, du reste, beaucoup mieux en les traitant comme des transformateurs.

Comme dans tout alternateur, l'induit donne lieu, en outre, au phénomène des fuites magnétiques, c'est-à-dire qu'une partie du flux produit par les courants alternatifs de l'induit se ferme sur elle-même par l'air ou les encoches. Cette fuite est en partie annulée par les fuites que le courant secondaire tend à produire en sens inverse (et qui annulent surtout l'effet du courant watté), de sorte qu'elle est bien plus faible que dans un moteur synchrone. Nous supposerons néanmoins pour la théorie générale qu'elle existe, et nous la représenterons comme d'habitude par une inductance s, donnant lieu à une réactance ωs.

Éléments qui déterminent les conditions pratiques de fonctionnement. — Cela posé, ce dont il importe de se bien pénétrer, c'est que le fonctionnement des convertisseurs dépend non seulement des propriétés de la machine, mais aussi des constantes du réseau d'alimentation; c'est en effet la self-induction de celui-ci et la différence entre sa force électromotrice et la force électromotrice induite du convertisseur qui règlent le rapport du courant déwatté au courant watté.

Tout courant déwatté en arrière de la force électromotrice produit un effet démagnétisant, tandis qu'un courant déwatté en avant produit un courant magnétisant. La variation des conditions du circuit extérieur constitue donc un procédé indirect pour faire varier l'excitation, mais souvent en sens contraire de ce qu'on voudrait.

I. — Choix des conditions d'alimentation de la machine.

Il importe d'après ce qui précède de connaître très exactement et quantitativement la façon dont varie le courant déwatté d'après les conditions d'alimentation, c'est-à-dire d'après les constantes du circuit et la force électromotrice appliquée. Cette étude fera l'objet d'un premier paragraphe.

Épure fondamentale. — Nous partirons tout simplement de notre vieille épure des alternateurs, à deux échelles, l'une pour les courants, l'autre pour les forces électromotrices.

Soit E_2 la tension secondaire aux bornes, $\mathcal{E} = OB$ (*fig.* 2) la

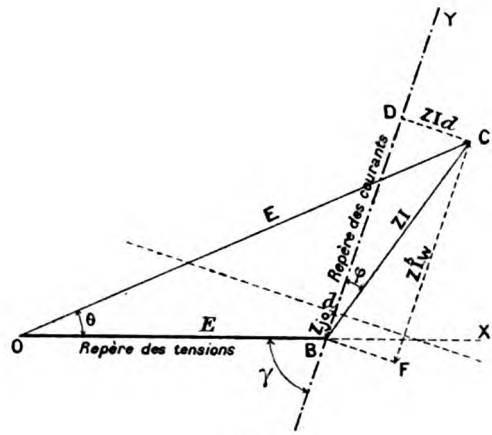


Fig. 2.

tension primaire qui lui est *sensiblement* proportionnelle par suite de la faible résistance interne de l'armature;

Soit $E = OC$ la force électromotrice de l'alternateur alimentant le convertisseur (ou la tension du réseau si l'appareil est branché sur un réseau). Dans tous les problèmes à traiter, OC est supposé constant à toutes les charges, si l'on ne fait pas d'hypothèses contraires;

Soit : R la résistance du *circuit* primaire du convertisseur;

$X = \omega(L + l + s)$ sa réactance, $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ son impédance; $\operatorname{tang}\gamma = \frac{X}{R}$ le coefficient de réactance.

Il s'agit ici du circuit primaire, *induit compris*. La constante X de réactance doit donc comprendre la réactance ωL des bobines de réaction mises en série avec le convertisseur et celle ωl de l'alternateur et de la ligne si l'alimentation est faite par un alternateur, et non par un réseau, et enfin la réactance ωs correspondant à l'effet des *fuites magnétiques* propres de l'induit.

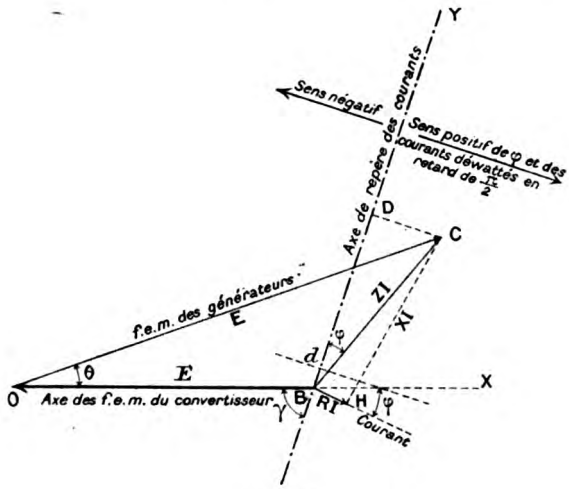


Fig. 3.

Pour chaque valeur θ du décalage entre les forces électromotrices E et $\mathcal{E}$, le troisième côté BC du triangle COB représente la force électromotrice résultante de E et $\mathcal{E}$, laquelle est égale au produit de l'impédance Z par le courant I qui la traverse. Si l'on a construit sur BC comme hypoténuse avec un angle γ en B le triangle CBH, celui-ci donne donc

$$BH = RI, \qquad HC = XI.$$

Nous appellerons toujours φ l'angle de décalage du courant par rapport à la tension aux bornes.

Pour que le vecteur BC mesure le courant I lui-même en grandeur et en phase, il suffit de prendre pour les ampères une

échelle Z fois plus grande que pour les volts et de prendre comme origine des décalages des courants une ligne de repère BDY faisant avec OX l'angle γ défini plus haut. L'angle DBC mesure alors le décalage φ, *en retard s'il est à droite* de BD et en avance s'il est à gauche. Nous comptons donc le courant déwatté, I_d, comme *positif* à droite de D et *négatif* à gauche.

Si l'on abaisse de C (*fig.* 3) une perpendiculaire CD sur cette droite BY, les segments CD et BD mesurent les courants déwattés et wattés pour chaque position de C. Le courant watté I_w peut être considéré lui-même comme la somme de deux parties, l'une fixe j_0 représentée par le segment Bd, qui correspond aux pertes par frottement, effet Joule, hystérésis et Foucault, presque constantes et l'autre réprésentée par Dd, qui correspond à l'énergie du courant secondaire utile et proportionnelle à celui-ci.

Équation fondamentale. — L'équation fondamentale qui relie $\mathcal{E}$, E et les courants watté et déwatté s'écrit immédiatement d'après la *fig.* 2. Le triangle OBC donne en effet

$$(a) \qquad E^2 = \mathcal{E}^2 + (ZI)^2 + 2\mathcal{E}\,(\text{proj. ZI sur } \mathcal{E})$$

ou, en remarquant que $I^2 = I_w^2 + I_d^2$ et remplaçant la projection de BC par celle de BDC,

$$(1) \qquad E^2 = \mathcal{E}^2 + Z^2(I_d^2 + I_w^2) + 2\mathcal{E}Z(I_w \cos\gamma + I_d \sin\gamma)$$

ou si l'on remarque que

$$\left\{\begin{array}{l} Z\cos\gamma = R \text{ résistance} \\ Z\sin\gamma = X \text{ réactance.} \end{array}\right.$$

$$(2) \qquad E^2 = \mathcal{E}^2 + Z^2(I_d^2 + I_w^2) + 2\mathcal{E}(RI_w + XI_d).$$

Cette équation permet de calculer le courant déwatté I_d en fonction de la charge, c'est-à-dire du courant watté I_w; car en résolvant par rapport à ZI_d, on a

$$Z^2I_d^2 + 2\mathcal{E}\sin\gamma\, ZI_d + \mathcal{E}^2 - E^2 + Z^2I_w^2 + 2\mathcal{E}ZI_w\cos\gamma = 0$$

$$(3) \qquad I_d = \frac{1}{Z}\left[-\mathcal{E}\sin\gamma + \sqrt{\mathcal{E}^2\sin^2\gamma + E^2 - Z^2I_w^2 - 2\mathcal{E}ZI\cos\gamma}\right].$$

Nous mettrons plus loin cette expression sous une autre forme.

Application de l'épure; représentation du fonctionnement, a potentiel constant aux bornes du réseau primaire et aux balais. — Si l'on se contente de vouloir maintenir le potentiel aux bornes constant, le segment OB = $\mathcal{E}$ reste constant, et, pour connaître tous les régimes, il suffit de faire décrire au point C qui définit le régime un cercle autour de O comme centre avec le rayon constant OC = E. Pour chaque position de C la charge est mesurée par dD et le courant déwatté par CD. On voit ainsi sur la *fig.* 4 que le courant déwatté, positif pour les faibles charges,

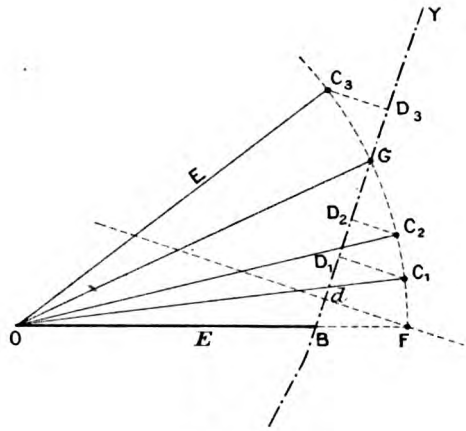


Fig. 4.

diminue à charge croissante depuis le maximum en F (débit secondaire seul) jusqu'à zéro en G, puis change de signe et recommence à croître.

Si l'on fait varier la force électromotrice d'alimentation E, ce qui revient à changer le rayon OC du cercle, on peut modifier à volonté la charge pour laquelle le courant déwatté s'annule.

La *fig.* 5, par exemple, où l'on a tracé quatre cercles de rayons différents, montre qu'on peut annuler le déphasage pour une charge utile dC$_2$ ou pour une charge zéro au lieu de dG, et même rendre, si l'on veut, le décalage négatif à toutes charges.

On voit que dans tous les cas on ne peut empêcher le courant déwatté d'être essentiellement variable d'une charge à l'autre; comme il produit une action magnétisante ou démagnétisante

égale à celle de

$$K \frac{N}{2} I_d \sqrt{2} \text{ ampères-tours inducteurs,}$$

on ne saurait maintenir une tension constante à l'aide d'une excitation constante si l'impédance du circuit n'est pas nulle, mais il faut augmenter ou réduire les ampères-tours d'excitation d'une quantité égale et opposée à celle des ampères-tours déwattés, de façon que le flux inducteur total reste constant (¹).

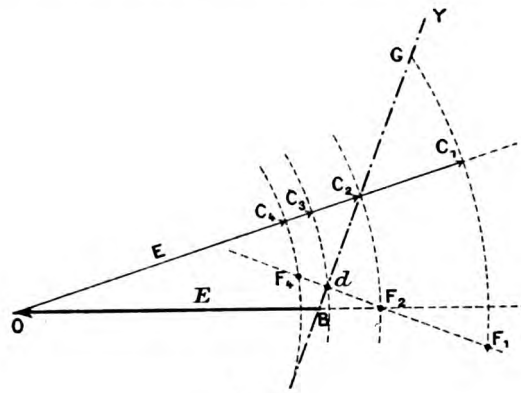


Fig. 5.

A égale valeur de γ, si l'on fait varier l'impédance Z, on voit que plus elle est grande, plus l'échelle des ampères est grande, et par suite moins grande est la variation de charge qui correspond à un déplacement angulaire donné du vecteur OC. Les variations du courant watté avec la charge seront donc d'autant plus grandes que l'impédance du circuit sera plus forte.

Si l'on fait varier l'impédance Z, en modifiant seulement la réactance X sans changer la résistance R, la question est moins claire, car l'orientation de la droite de repère OY change en même temps que l'échelle des intensités. Elle sera traitée ci-dessous avec détails à propos du cas général.

Cas général. — *Valeurs du courant déwatté pour une*

(¹) La variation des fuites peut introduire une petite complication, comme on le verra plus loin.

variation de tension donnée en fonction de la charge. — Dans le cas le plus ordinaire, on doit chercher à relever un peu le voltage quand la charge augmente, pour compenser les pertes dans la distribution.

Soit (*fig.* 6) $\mathcal{E}$ la force électromotrice à vide, $\mathcal{E}'$, $\mathcal{E}''$, $\mathcal{E}'''$, etc.,

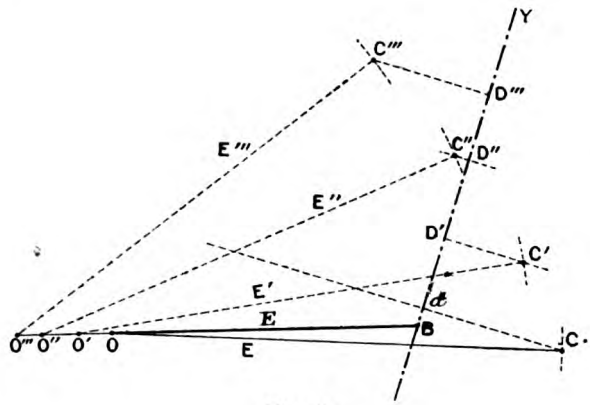


Fig. 6.

les valeurs successives que doit prendre $\mathcal{E}$ quand les charges correspondent à des courants wattés I'_w, I''_w, I'''_w, etc. On portera ces courants sur la ligne de repère BY à partir de B en BD′, BD″, BD‴, et les forces électromotrices sur la ligne horizontale BO à partir de B vers la gauche en BO, BO′, BO″, BO‴, etc.

De chacun des points (*fig.* 6) O ainsi déterminés on tracera un arc de cercle avec un même rayon égal à la force électromotrice extérieure E, constante supposée donnée [1]. Les points de rencontre respectifs avec les lignes *d*C, D′C′, D″C″, D‴C‴ menées perpendiculairement à la ligne de repère BY donnent les points régimes correspondant aux diverses charges.

Les courants déwattés correspondant à celles-ci sont donc entièrement déterminés.

On voit qu'il y a une infinité de solutions possibles suivant la valeur qu'on choisit pour la force électromotrice constante E,

---

[1] Sur la *fig.* 6 on a, pour plus de généralité, supposé que les forces électromotrices E′, E″, E‴ pourraient être inégales.

force électromotrice qu'on est maître de réaliser plus ou moins élevée par le choix du rapport de transformation des transformateurs statiques alimentant les convertisseurs.

En outre, on est maître aussi de l'impédance Z, dans certaines limites tout au moins, par l'addition de self-inductions dans le circuit d'alimentation. (Il va sans dire qu'on doit réduire le plus possible la résistance morte pour ne pas déprimer le rendement.) On doit donc rechercher maintenant quelles sont les valeurs les plus favorables à choisir pour E et pour X; c'est ce que nous allons faire dans les deux paragraphes suivants.

Valeur la plus avantageuse à choisir pour la force électromotrice d'alimentation. — C'est évidemment celle qui annule le décalage pour le régime de charge le plus fréquent, car on obtient ainsi le minimum de courant et par suite le meilleur rendement de la ligne, et la meilleure utilisation des appareils. Ce régime peut être déterminé d'après les conditions d'emploi prévues.

On pourrait être tenté de le fixer *a priori* au maximum de la charge, car c'est à ce moment qu'on a le plus besoin de ne rien perdre inutilement; mais comme il s'agit toujours en pratique d'une question d'échauffement *moyen* et de rendement *moyen* journalier, c'est à la charge normale qu'il faut appliquer de préférence cette condition de déphasage nul et non aux régimes forcés accidentels.

Il y a du reste intérêt, pour réaliser avec plus de précision la variation de tension voulue, à placer le régime de déphasage nul vers la charge moyenne. On ne peut, en effet, comme on le verra ci-dessous, réaliser avec exactitude, par les procédés pratiques d'excitation, que les tensions correspondantes au déphasage nul et à la charge nulle.

Valeur la plus avantageuse à choisir pour la réactance X. — Il est tout d'abord fort important de remarquer qu'une certaine réactance minima est nécessaire si l'on veut obtenir avec une force électromotrice constante E des tensions croissantes, ou même seulement constantes, avec la charge.

Supposons, en effet, qu'on ait un circuit sans réactance, ce qui

donne $\gamma = 0$; la ligne de repère BY (*fig.* 7) se confondra alors avec l'axe OX, et les courants de charges croissantes seront représentés en B*d*, BD′, BD″, ... Soit D″ par exemple le régime normal sans décalage: les vecteurs C*d*, C′D′, C″D″ qui mesurent les courants déwattés correspondants vont en croissant extrêmement vite

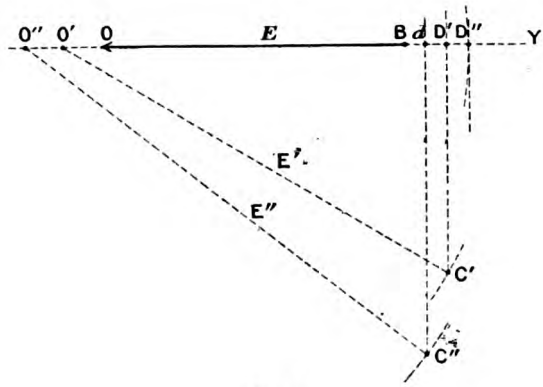


Fig. 7.

aux faibles charges, et, comme l'échelle des courants, est très petite vû la petitesse de Z, on voit que les courants déwattés aux faibles charges seraient énormes. Au contraire, dans le cas de la *fig.* 6, grâce au fait que les lignes de charge ne sont plus perpendiculaires à OB, il est facile de trouver avec une force électromotrice constante E et de faibles courants déwattés, des points régimes C, C′, C″ correspondant à des points O, O′, O″ qui se déplacent vers la gauche, et par conséquent faisant croître la tension aux balais $\frac{\mathcal{E}}{\xi}$.

Donc, avec une source à force électromotrice constante, on ne peut obtenir économiquement une régulation à voltage constant ou croissant avec la charge que si le circuit contient une certaine self-induction.

Cela posé, on peut se rendre compte assez facilement de l'influence de la réactance, en supposant qu'on annule toujours le décalage à la même charge, c'est-à-dire pour la même intensité de courant watté I_w. En effet (*fig.* 8) tous les points régimes G correspondant à cette condition se trouvent à des distances ZI_w du

point B proportionnelles aux impédances $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$; donc, si l'on prend sur le prolongement de OB un segment BK égal à RI_w, tous les points G correspondant à des réactances X différentes se trouvent sur la droite KP perpendiculaire à OK. De même le point de charge nulle d se trouve sur la perpendiculaire kd correspondant à un segment $Bk = Rj_0$. Nous allons comparer, dans les divers cas, les valeurs du courant déwatté i_0 correspondant à ce régime de charge nulle.

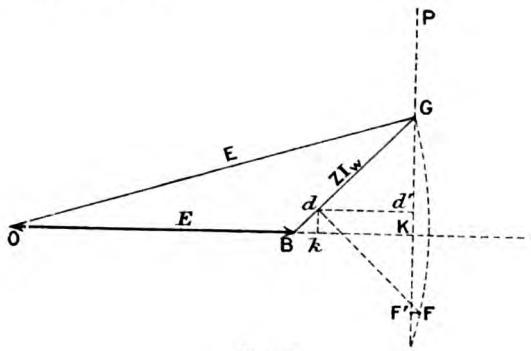


Fig. 8.

Ce courant déwatté s'obtient en traçant par d la droite dF perpendiculaire à BG jusqu'à sa rencontre avec le cercle de rayon E. Pour ramener ce courant à être comparable à BK, il suffit de réduire aussi le segment dF dans le rapport $\frac{R}{Z}$, ce qu'on obtient en le projetant sur KG. Le segment $d'F'$ mesure la valeur $R\,i_0$, tandis que BK mesure RI_w.

Par ce procédé tous les courants se trouvent ramenés à une même échelle i_0 quelle que soit la valeur de Z. En recommençant la construction pour diverses inclinaisons de la droite de repère BG, on trouve que le courant déwatté, très grand pour les très faibles décalages de cette droite, diminue d'abord vite, puis plus lentement.

Pour suivre plus facilement la loi de variation, supposons le courant watté à vide nul ($j_0 = 0$), c'est-à-dire confondons d avec D (*fig.* 10). Le courant déwatté i_0 est alors proportionnel simplement à la hauteur FH.

Si l'on élève le point G peu à peu sur la verticale KG en partant

du point K, le courant déwatté est d'abord égal à $\frac{BF_0}{R}$ (*fig.* 9),

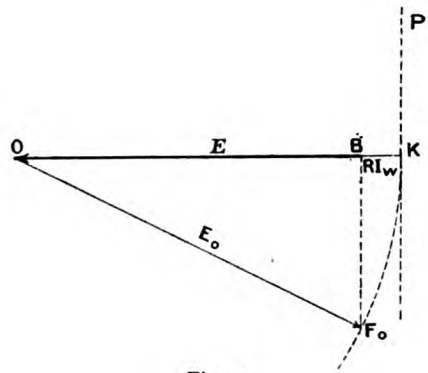


Fig. 9.

puis il va en décroissant ; il se réduit par exemple à FH pour la position G. Puis, quand G sera très élevé, on voit qu'une surélévation G′ G″ par exemple accroîtra presque proportionnellement le rayon E sans modifier sensiblement l'inclinaison du segment BF′. De sorte qu'en augmentant la réactance au delà d'un certain point, le courant déwatté à vide i_0 croît avec elle.

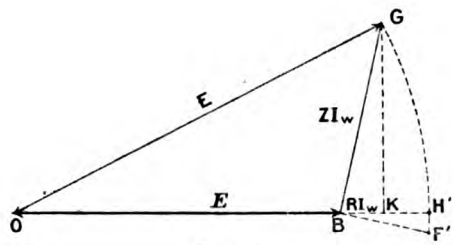


Fig. 10.

i_0 doit donc avoir un minimum, et à chaque valeur plus élevée correspondront deux valeurs de la réactance, deux inclinaisons de la droite BG, l'une plus grande, l'autre plus faible.

Pour préciser davantage cette recherche du minimum, il suffit de recourir au calcul en exprimant qu'une même valeur de la tension d'alimentation E permet d'obtenir le régime sans décalage G et le régime sans travail F.

Pour plus de généralité reprenons le cas général ou j_0 n'est pas nul et où l'on désire une tension en charge $\mathcal{E}'$ différente de la tension à vide $\mathcal{E}$.

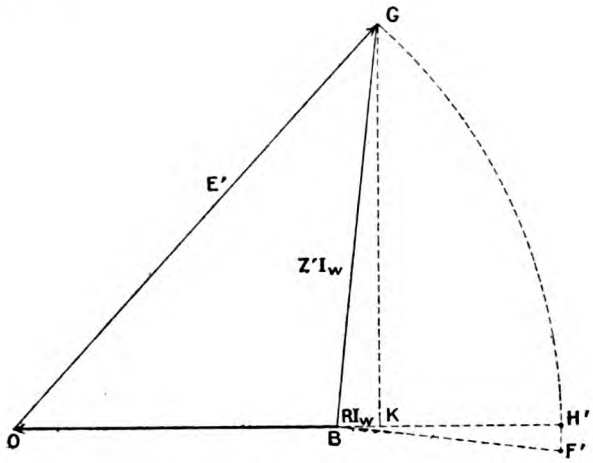


Fig. 11.

On aura les deux relations suivantes :

Au point G

$$(a) \qquad E^2 = \mathcal{E}'^2 + Z^2 I_w^2 + 2\,\mathcal{E}' R I_w.$$

Au point F

$$(b) \qquad E^2 = \mathcal{E}^2 + Z^2 i_0^2 + 2\,\mathcal{E} X i_0.$$

D'où en éliminant E

$$(4) \qquad \mathcal{E}'^2 + Z^2 I_w^2 + 2\,\mathcal{E}' R I_w - \mathcal{E}^2 - Z^2 i_0^2 - 2\,\mathcal{E} X i_0 = 0.$$

Telle est la condition cherchée. En résolvant par rapport à i_0, puis, par rapport à la réactance X, on obtient les deux formules suivantes :

$$(5) \qquad i_0 = \frac{-\mathcal{E} X + \sqrt{\mathcal{E}^2 X^2 + Z^2(\mathcal{E}'^2 - \mathcal{E}^2 - Z^2 I_w^2 + 2\,\mathcal{E}' R I_w)}}{Z^2},$$

$$(6) \qquad X = \frac{\mathcal{E} i_0 \pm \sqrt{\mathcal{E}^2 i_0^2 - (I_w^2 - i_0^2)[\mathcal{E}'^2 - \mathcal{E}^2 + R^2(I_w^2 - i_0^2) + 2\,\mathcal{E}' R I_w]}}{I_w^2 - i_0^2}.$$

Nous prenons dans i_0 le radical avec le signe + seul, parce que,

pour chaque valeur de X, i_0 n'a jamais qu'une seule valeur, et forcément positive; au contraire, on a vu que X a deux valeurs pour chaque valeur de i_0; d'où nécessité de prendre les deux signes devant le radical.

La valeur minima i_0 pourrait s'obtenir en annulant la dérivée de l'équation (5); mais il est plus simple d'annuler le radical de l'équation (6), car la valeur minima possible de i_0 est évidemment celle au-dessous de laquelle la valeur de X deviendrait imaginaire.

Nous écrivons donc, en ordonnant pour simplifier par rapport à $I_w^2 - i_0^2$, au lieu de i_0^2, le polynome sous le radical de (6),

$$(7) \qquad \mathcal{E}^2 I_w^2 - (I^2 - i_0^2)[\mathcal{E}'^2 + 2\mathcal{E}' R I_w] - R^2(I_w^2 - i_0^2)^2 = 0.$$

La chute ohmique ne devant être qu'une très faible fraction de E, le dernier terme $R^2(I_w^2 - i_0^2)$ peut être négligé, et l'on obtient ainsi la valeur approchée

$$I_w^2 - i_0^2 = \frac{I_w E_1^2}{\mathcal{E}'^2 - \mathcal{E}^2 + 2\mathcal{E}' R I_w},$$

ou

$$\text{minimum } i_0^2 = \frac{\mathcal{E}'^2 - \mathcal{E}^2 + 2\mathcal{E}' R I_w}{\mathcal{E}'^2 + 2\mathcal{E}' R I_w} I_w^2.$$

Le radical de l'équation (6) s'annulant sensiblement pour cette valeur, l'expression de X correspondant au minimum de courant déwatté i_0 est simplement par approximation

$$X_0 = \frac{\mathcal{E} i_0}{I_w^2 - i_0^2}$$

ou, en substituant i_0,

$$X_0 = \frac{\sqrt{(\mathcal{E}'^2 + 2\mathcal{E}' R I_w)(\mathcal{E}'^2 + 2\mathcal{E}' R I_w - \mathcal{E}^2)}}{\mathcal{E} I_w}.$$

Telle est la réactance la plus avantageuse pour la réduction de i_0. Comme, d'autre part, la tension d'alimentation nécessaire croît avec la réactance X, et qu'on doit chercher à la conserver aussi faible que possible pour utiliser le mieux possible le matériel générateur et ne pas lui donner des dimensions exagérées par rapport à la puissance réellement débitée, il faut conclure que *la réactance devra en général être comprise entre zéro et la valeur* X_0 *qui correspond au courant déwatté minimum à vide.*

Remarque I. — Les formules (5), (6), (7), (8) peuvent se mettre sous une forme souvent plus commode pour la pratique en exprimant les valeurs i_0 en fonction de I_w, RI en fonction de $\mathcal{E}$, $\mathcal{E}'$ en fonction de $\mathcal{E}$, X en fonction de R.

Posons donc

$$\frac{\mathcal{E}'}{\mathcal{E}} = (1+\varepsilon), \qquad \frac{RI_w}{\mathcal{E}} = \alpha, \qquad \frac{X}{R} = m, \qquad \frac{i_0}{I_w} = \operatorname{tang}\varphi,$$

$\cos\varphi$ étant le facteur de puissance, et m la valeur de $\operatorname{tang}\gamma$.

On en déduit

$$\frac{XI_w}{\mathcal{E}} = \alpha m,$$

$$\frac{\mathcal{E}}{Z} = \frac{I_w}{\alpha\sqrt{1+m^2}},$$

et les formules équivalentes

$$(5') \quad i_0 = \frac{I_w}{\alpha(1+m^2)}\left\{-m+\sqrt{m^2+\alpha^2(1+m^2)^2+(1+m^2)[\varepsilon^2+2\varepsilon+2\alpha(1+\varepsilon)]}\right\},$$

$$(6') \quad X = \frac{R\operatorname{tang}\varphi}{\alpha(1-\operatorname{tang}^2\varphi)} \pm R\sqrt{\frac{\operatorname{tang}^2\varphi}{\alpha^2(1-\operatorname{tang}^2\varphi)} - \frac{\frac{2}{\alpha}(1+\varepsilon)+\frac{\varepsilon^2+2\varepsilon}{\alpha^2}}{1-\operatorname{tang}^2\varphi} - 1},$$

$$(7') \qquad \text{minimum } i_0^2 = I_w^2\,\frac{(1+\varepsilon)^2-1+2\alpha(1+\varepsilon)}{(1+\varepsilon)^2+2\alpha(1+\varepsilon)},$$

$$(8') \qquad X_0 = \frac{R}{\alpha}\sqrt{[(1+\varepsilon)^2+2\alpha(1+\varepsilon)][\varepsilon^2+2\varepsilon+2\alpha(1+\varepsilon)]}.$$

En particulier dans le cas où la tension doit être invariable, $\mathcal{E}' = \mathcal{E}$ ou $\varepsilon = 0$, l'expression de i_0^2 se réduit simplement à

$$i_0^2 = I_w^2\,\frac{2\alpha}{1+2\alpha},$$

qui donne sensiblement

$$i_0 = I_w\sqrt{2\alpha} \qquad \text{et} \qquad X_0 = \frac{R}{\alpha}\sqrt{2\alpha(1+2\alpha)},$$

ou sensiblement $X_0 = R\sqrt{\frac{2}{\alpha}}$.

Remarque II. — Dans le cas particulier où $i_0 = I_w$, $\operatorname{tang}\varphi = 1$, les formules (7) et (7') ne sont plus applicables et doivent être remplacées par les suivantes déduites de l'équation (4) :

$$(7a) \qquad X = \frac{\mathcal{E}'}{\mathcal{E}}\,\frac{RI_w}{i_0} - \frac{\mathcal{E}'^2-\mathcal{E}^2}{2\mathcal{E}i_0},$$

ou

$$(7a') \qquad X = \frac{R}{\tan g\varphi}\left[(1+\varepsilon) - \frac{\varepsilon^2 + 2\varepsilon}{2\alpha}\right].$$

Régulation de la tension aux bornes par variation de la tension alimentaire E. — Dans tout ce qui précède, on a supposé la tension d'alimentation E constante à toutes charges; c'est ce qui oblige à avoir du courant déwatté aux faibles charges.

On peut au contraire se proposer de compounder ou régler automatiquement l'excitation de l'alternateur de façon que sa force électromotrice E aille en croissant avec la charge. Ce compoundage dispensera alors de toute réactance et l'on pourra diriger la ligne de repère en prolongement de la ligne OB, en n'admettant d'autre chute de voltage que la chute ohmique.

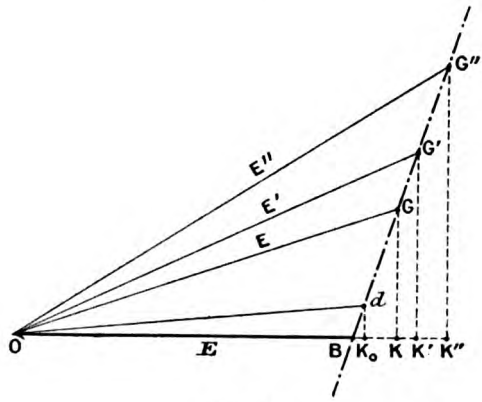


Fig. 12.

Cette solution est évidemment la plus parfaite théoriquement, mais elle ne pourrait être réalisée exactement que dans le cas exceptionnel où des convertisseurs seraient seuls alimentés par un alternateur.

Sinon on ne peut établir de corrélation entre la charge des convertisseurs et celle des lignes qui distribuent le courant en même temps à d'autres appareils.

Mais on peut se rapprocher par approximation de cette méthode de régulation en alimentant les convertisseurs par des transfor-

mateurs à rapport de transformation variable au moyen d'un secondaire divisé en sections aboutissant à un commutateur à touches.

L'épure fondamentale (*fig.* 12), ou la formule (*a*), détermine les valeurs à donner à E pour chaque valeur de la force électromotrice $\mathcal{E}$ et de la charge ZI_w portée sur la ligne BY correspondant à la réactance fixe du circuit. La valeur la plus avantageuse de cette dernière est évidemment ici la plus faible possible, $X = 0$ si l'on peut; car c'est celle qui réduit au minimum les valeurs de la force électromotrice nécessaire E. On devra donc n'intercaler aucune self-induction supplémentaire dans le circuit. BY vient alors en prolongement de OB.

Régulation de la tension aux bornes par variation de la réactance. — On peut aussi annuler le décalage à toutes charges plus simplement en gardant une tension d'alimentation constante E, égale à celle qui est nécessaire pour assurer la tension

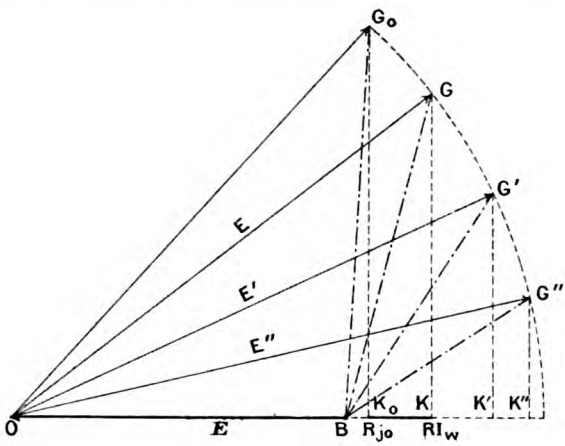


Fig. 12.

aux bornes désirée à pleine charge sans courant déwatté, et réduisant cette tension aux charges décroissantes par l'addition de réactances convenables en circuit.

La *fig.* 13 explique ce mode de régulation dans le cas d'une force électromotrice E constante et permet de la préciser.

Soit $BK = RI_w$, la perte de tension par effet Joule dans le circuit à pleine charge; le segment BK peut servir à représenter le courant watté.

Si l'on représente de même par BK′, BK″ des courants intermédiaires et qu'on élève les perpendiculaires correspondantes KG, K′G′, K″G″, leurs rencontres G, G′, G″ avec le cercle du rayon E décrit autour du centre O définiront les régimes qui réalisent ces charges.

Pour qu'ils soient obtenus sans courants déwattés, il suffit que, pour chacun d'eux, la réactance soit choisie précisément égale à celle qui fait passer la ligne de repère par G. C'est-à-dire qu'il suffira de faire la réactance X égale successivement à

$$\frac{GK}{BK} \times R, \quad \frac{G'K'}{BK'} \times R, \quad \frac{G''K''}{BK''} \times R, \quad \ldots.$$

Ces valeurs de X peuvent être calculées pour chaque valeur de I_w par l'équation (a) donnée plus haut:

$$E^2 = \mathcal{E}'^2 + Z^2 I_w^2 + 2\mathcal{E}' R I_w,$$

d'où

$$X^2 = -R^2 + \frac{E^2 - \mathcal{E}'^2 - 2\mathcal{E}' R I_w}{I_w^2}.$$

Pratiquement, cette régulation pourra être faite à la main ou même automatiquement en employant en série des bobines de self-induction à noyaux mobiles, qu'on enfoncera au maximum à vide et qu'on retirera peu à peu sous les charges croissantes, de façon à ramener toujours au zéro les indications d'un phasemètre à lecture directe branché aux bornes des convertisseurs.

La méthode est applicable, quelle que soit la valeur de E, c'est-à-dire du rayon du cercle; mais la valeur la plus avantageuse est évidemment la plus petite, qui correspond à

$$E = \mathcal{E}' + RI.$$

La figure suppose que le lieu du point G est un cercle; mais si la tension $\mathcal{E}$ varie, le centre O de ce cercle se déplace, et le lieu de G est une courbe, qu'on peut tracer par points d'après les données. Cela ne modifie en rien la méthode.

Facteur de puissance du générateur. — Dans ce qui précède

nous avons insisté sur la nécessité de ne pas accroître trop la force électromotrice $\mathcal{E}$. On chiffre ordinairement les inconvénients de cette augmentation inutile par la valeur du *facteur de puissance,* c'est-à-dire du cosinus du décalage entre la force électromotrice et le courant.

Appelons ψ ce décalage et θ celui de $\mathcal{E}$ par rapport à E; d'autre part on a appelé φ le décalage du courant par rapport à $\mathcal{E}$ en posant

$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{I_d}{I_w},$$

et cet angle de retard φ est toujours dirigé dans le même sens que θ (voir *fig.* 1), c'est-à-dire compté positivement dans le sens des aiguilles d'une montre. On a donc

$$\psi = \theta + \varphi.$$

Pour le régime moyen G, dit sans décalage, on a $\varphi = 0$ et ψ se réduit à l'angle θ lui-même.

Pour accroître le facteur de puissance du générateur à la charge moyenne, on devra donc réduire autant que possible θ et par suite $\mathcal{E}$, comme on l'a dit plus haut.

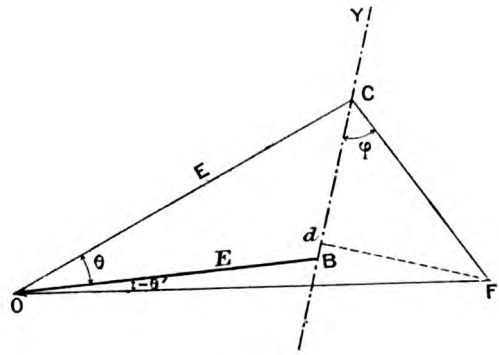


Fig. 14.

Cette considération beaucoup plus importante que la réduction du décalage à vide par rapport à la force électromotrice du convertisseur conduira en général à adopter pour la réactance une valeur comprise entre zéro et la valeur qui rend ce dernier mini-

mum. Cela est d'autant plus indiqué qu'aux charges très faibles le décalage θ devient alors négatif comme l'indique la *fig.* 14 et que la valeur de ψ est une différence :

$$\psi = \varphi - \theta',$$

qui ne croît que lentement avec φ.

Il sera logique de chercher à égaler θ et $\varphi - \theta'$, de façon à rendre égales et minima les deux valeurs extrêmes de ψ.

II. — DÉTERMINATION DE L'EXCITATION DU CONVERTISSEUR.

Les considérations précédentes ont eu pour résultat de fixer les conditions d'alimentation du convertisseur, et en particulier de la réactance, en vue de pouvoir obtenir pour celui-ci une variation de tension donnée avec la charge sans dépasser un certain maximum de courant déwatté, et même en se rapprochant du minimum de ce courant. Il reste maintenant à résoudre la seconde partie du problème, à savoir la détermination des ampères-tours inducteurs, enroulés soit en série, soit en dérivation, qui permettent au convertisseur de suivre approximativement cette loi de variation grâce au jeu des courants déwattés.

Dans ce qui suit, nous supposerons d'abord exclusivement que l'on se trouve dans les conditions ordinaires d'un convertisseur travaillant sans décalage à sa charge moyenne et étant par conséquent parcouru aux charges plus faibles par un courant positif déwatté $\left(\text{en retard de } \frac{\pi}{2} \text{ sur la force}\right)$ électromotrice, et par suite magnétisant [1]. C'est le cas étudié dans tout ce qui précède.

Éléments caractéristiques du convertisseur. — Ici doivent intervenir les propriétés magnétiques de la machine, qui se traduisent par deux éléments essentiels nouveaux.

1° La caractéristique d'excitation, c'est-à-dire la courbe de

---

[1] Il est facile de voir que tout courant déwatté *en retard* par rapport à la force électromotrice extérieure E est un courant décalé en avance par rapport à la force électromotrice intérieure $\mathcal{E}$, puisque E et $\mathcal{E}$ sont à peu près en opposition.

Il tend donc à renforcer la force électromotrice $\mathcal{E}$ d'après ce qu'on sait des alternateurs en général.

variation de la force électromotrice induite en fonction des ampères-tours inducteurs placés sur les bobines excitatrices. Cette courbe est supposée connue par des essais d'atelier; les forces électromotrices induites sont portées en ordonnées et les ampères-tours excitateurs en abscisses (*fig.* 15).

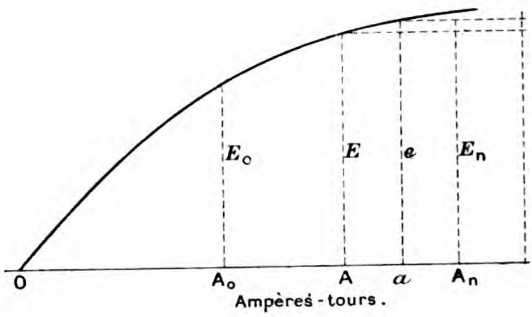


Fig. 15.

2° La force magnétomotrice équivalente de l'induit, c'est-à-dire le chiffre des ampères-tours, qui, placés sur les inducteurs, produiraient même force magnétomotrice dans le circuit magnétique que le courant déwatté I_d circulant dans l'induit.

Ces ampères-tours moyens équivalents peuvent être représentés comme dans un alternateur par l'expression

$$K \frac{N'}{2} I_d \sqrt{2},$$

en appelant N′ le nombre de *fils* périphériques de l'induit par champ double (c'est-à-dire dans un circuit magnétique), K un coefficient de réduction qui dépend du nombre de phases et d'encoches et de la largeur des pôles, et I_d l'intensité *efficace* du courant déwatté.

On détermine K par le calcul en faisant $I_d = 1$ ampère avec un décalage nul, et en calculant le potentiel magnétique moyen produit sous un pôle.

On le mesure expérimentalement avec une approximation généralement suffisante (parce que la réactance de fuite ωs est sensiblement négligeable) en faisant tourner à la vitesse normale le convertisseur par l'effet d'une force extérieure et en lui faisant alimenter (du côté alternatif), avec sa tension normale, un circuit

extérieur purement inductif (formé de self-inductions donnant un cos φ au plus égal à 0,20); la différence entre la tension aux bornes $\mathcal{E}$ sous cette charge et celle e qu'on mesure à circuit ouvert sous la même excitation mesure en volts la réaction d'induit correspondant au courant débité.

Si l'on reporte e et $\mathcal{E}$ en ordonnées sur la courbe d'excitation, la différence des abscisses A et a (*fig.* 15) mesure (en négligeant toujours les fuites) les ampères-tours équivalents de l'induit. Il suffit de diviser A — a par le courant efficace I_d débité dans l'expérience multiplié par $\sqrt{2}$ et par le nombre de spires $\frac{N}{2}$ pour obtenir K :

$$K = \frac{A - a}{\frac{N}{2} I_d \sqrt{2}}. \tag{16}$$

Étude d'une excitation compound; différents éléments de l'excitation. — L'excitation des convertisseurs est prise aux bornes du secondaire; elle peut être faite évidemment soit en dérivation, soit en série, soit en compound.

Soit $\mathcal{E}_2$ la tension secondaire aux bornes, I_2 le courant débité, n le nombre de spires de l'excitation en série, r la résistance d'une spire de l'enroulement shunt, les ampères-tours en shunt et en série seront respectivement

$$\frac{\mathcal{E}_2}{r} \quad \text{et} \quad n I_2.$$

Ce sont eux qui, concurremment avec les ampères-tours équivalents de l'induit, déterminent l'excitation totale.

Dans le cas le plus général, celui d'un convertisseur compound, la question est donc fort complexe, puisqu'il y a trois éléments variables, le premier avec la tension, le second avec le courant débité, et le troisième avec le courant déwatté.

Comme on l'a vu plus haut, les ampères-tours secondaires sont proportionnels aux ampères-tours primaires utiles $I_w - j_0$.

D'autre part, si l'on appelle ξ le rapport de transformation, c'est-à-dire le rapport de la force électromotrice primaire à la force électromotrice secondaire, comme la résistance de l'induit est déjà par hypothèse comptée une fois dans le circuit d'alimentation,

on n'a plus à la compter ici, et l'on peut poser

(17) Ampères-tours de l'excitation dérivée $A_d = \left(\frac{1}{\xi r}\right)\mathcal{E}$,

(18) Ampères-tours de l'excitation [1] en série $A_s = nI_2 = \left(\frac{\pi k n}{\sqrt{2}}\right)(I_w - j_0)$,

(19) » déwattés, produits par l'armature $A_a = \left(\frac{KN'}{\sqrt{2}}\right) I_d$.

Les forces magnétomotrices se trouvent ainsi exprimées directement en fonction des éléments des courants primaires, ce qui va nous permettre de calculer les excitations à chaque régime.

Si l'on compte toujours comme positifs les courants déwattés en retard (qui sont magnétisants), le nombre total des ampères-tours inducteurs au régime $\mathcal{E}\, I_w$ est donc

$$(20) \qquad A = \frac{\mathcal{E}}{\xi r} + \frac{\pi k n}{\sqrt{2}}(I_w - j_0) + \frac{KN'}{\sqrt{2}} I_d.$$

Nous mettons le signe + devant les ampères-tours déwattés, parce que, dans les conditions d'alimentation normales étudiées plus haut, le courant déwatté est dirigé à droite de D, c'est-à-dire *positif et magnétisant* entre la charge à vide et la charge normale, puis démagnétisant au delà. Nous affectons les ampères-tours en série du signe + parce qu'en général cet enroulement doit être concordant avec l'enroulement shunt, comme on le verra plus loin.

Les constantes inconnues r et n des enroulements sont faciles à prédéterminer, quand on connaît les forces électromotrices $\mathcal{E}_0$ et $\mathcal{E}_m$ à réaliser à vide et à la charge moyenne I_m où le décalage est nul. Soient, en effet, sur la caractéristique A_0 et A_m les ampères-

---

[1] D'après l'égalité du premier paragraphe (relation entre le courant alternatif I_w et le courant continu débité I_2)

$$I_2 = \frac{\pi K}{\sqrt{2}} I_w,$$

dans laquelle on remplace, pour plus de précision, I_w par $I_w - j_0$. Si l'induit portait deux enroulements différents, on multiplierait le rapport par celui des nombres des spires de ces deux enroulements $\frac{N}{N_2}$.

tours correspondant à $\mathcal{E}_0$ et à $\mathcal{E}_m$; on aura pour le second régime

$$(21) \qquad \frac{1}{\xi r}\mathcal{E}_m + \frac{\pi k n}{\sqrt{2}}(I_m - j_0) = A_m,$$

et pour le premier

$$(22) \qquad \frac{1}{\xi r}\mathcal{E}_0 + \frac{KN'}{\sqrt{2}} i_0 = A_0.$$

Si l'on se donne le courant déwatté à vide, dont la valeur ne peut descendre au-dessous d'un certain minimum comme on l'a expliqué plus haut, la seconde équation détermine la conductance $\frac{1}{r}$ d'une spire de shunt

$$(23) \qquad \frac{1}{r} = \frac{\xi}{\mathcal{E}_0}\left(A_0 - \frac{KN' i_0}{\sqrt{2}}\right),$$

et la première donne ensuite le nombre de spires en série

$$(24) \qquad n = \frac{A_m - \frac{\mathcal{E}_m}{\xi r}}{\pi k (I_m - j_0)}\sqrt{2} = \frac{\left(A_m - \frac{\mathcal{E}_m}{\mathcal{E}_0} A_0\right)\sqrt{2} + \frac{\mathcal{E}_m}{\mathcal{E}_0} KN' i_0}{\pi k (I_m - j_0)}.$$

On voit de plus que les ampères-tours en dérivation, proportionnels $\frac{\mathcal{E}_m}{r}$, sont plus petits que les ampères-tours totaux A_0 (en supposant $\mathcal{E}_m > \mathcal{E}_0$) et qu'ils décroissent quand croît le courant déwatté i_0, tandis que les ampères-tours en série, proportionnels à $n(I_m - j_0)$, croissent avec ce courant i_0.

Détermination du courant déwatté en fonction de l'excitation a courant watté constant, puis a puissance constante, sous une force électromotrice constante de la génératrice. — Supposons, comme pour les moteurs synchrones, le convertisseur alimenté par une force électromotrice constante E, et excité par un courant inducteur réglable à volonté.

L'épure fondamentale (*fig.* 2) combinée avec la courbe précédente (*fig.* 16) permettra d'abord aisément de trouver, pour chaque valeur du courant watté I_w, les valeurs du courant déwatté correspondant à chaque valeur de l'excitation, exprimée en ampères-tours.

En effet, soit par exemple I_w le courant watté donné, et BD la ligne de repère, tracée grâce à la connaissance supposée acquise du coefficient γ. Le lieu du point C, caractéristique du régime, pour cette valeur constante de I_w est la droite DQ tracée perpendiculairement à BD, à la distance $BD = ZI_w$, tandis que le lieu du point O, seconde extrémité du vecteur E, est la ligne OBX.

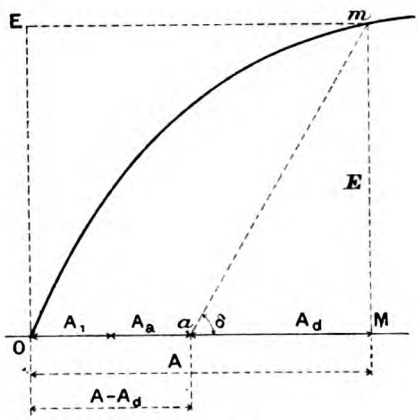


Fig. 16.

Tous les régimes correspondant au courant watté I_w seront donc obtenus en traçant de tous les points C, C′, C″... de la première droite des arcs de cercle de rayon E coupant la seconde en O, O′, O″.... Les segments BO, BO′, BO″ ainsi formés mesurent les valeurs des forces électromotrices intérieures $\mathcal{E}$, $\mathcal{E}'$, $\mathcal{E}''$... correspondantes, et les segments DC, DC′, DC″..., divisés par Z, mesurent les valeurs du courant déwatté I_d.

Pour chaque paire de valeurs de $\mathcal{E}$ et I_d ainsi déterminées, on obtient les ampères-tours excitateurs A_e par la courbe d'excitation (*fig.* 16) en retranchant des ampères-tours résultants A, correspondant à l'ordonnée ε de cette courbe, les contre-ampères-tours de l'induit; d'où

$$A_e = A \mp \frac{KN'}{\sqrt{2}} I_d.$$

Il ne faut pas oublier que le courant déwatté I_d est démagnétisant et positif s'il est compté à droite de l'axe BD, et négatif et magné-

tisant s'il est compté à gauche. Le signe supérieur s'applique au premier cas et le signe inférieur au second.

Cela posé, l'épure permet maintenant de déterminer le lieu des points C et les variations de E à puissance constante, si l'on maintient la force électromotrice de la génératrice constante, comme dans le cas des moteurs synchrones. On a en effet ici simplement

$$P = \mathcal{E} I_w,$$

de sorte que pour chaque valeur de I_w, et par conséquent pour chaque position de la droite DQ, la valeur de $\mathcal{E}$, et par suite la la position du point O, sont connues, et l'on peut aussitôt tracer de ces points des cercles de rayons E, dont les intersections respectives avec les droites DQ donnent les points C cherchés. On pourra ainsi tracer les courbes en V analogues à celles des moteurs synchrones et les courbes des valeurs de $\mathcal{E}$ correspondantes. Mais ces régimes à puissance constante ne présentent plus pour les convertisseurs le même intérêt pratique que pour les moteurs, car la variation de $\mathcal{E}$ serait fort gênante.

Différentes valeurs de l'excitation a puissance constante et potentiel constant. Courbes en V a tension constante. — L'épure précédente (*fig.* 16 et 17) donne aussi la solution immédiate du problème plus pratique [1] qui consiste à déterminer les intensités du courant I correspondant aux différentes excitations, sous puissance constante *et sous tension secondaire aux balais constante*. C'est le même problème que le précédent, avec cette modification que ce n'est pas la différence de potentiel aux bornes qu'on doit ici supposer constante, mais la force électromotrice induite $\mathcal{E}$.

Le lieu du point C est encore la droite CD elle-même. Mais nous ajoutons la condition que le segment OB reste constant; le point O devient donc invariable (*fig.* 17 *bis*).

Pour chaque position du point C, le segment CB correspondant

---

[1] Le cas que l'on considère est le cas d'utilisation. Mais ce n'est encore qu'un cas théorique, puisqu'on suppose la force électromotrice maintenue rigoureusement constante et l'on verra plus loin qu'on ne peut réaliser cette condition qu'approximativement. Dans le cas général on fera donc varier à la fois $\mathcal{E}$ et E.

indique le courant, et OC la force électromotrice nécessaire à la génératrice.

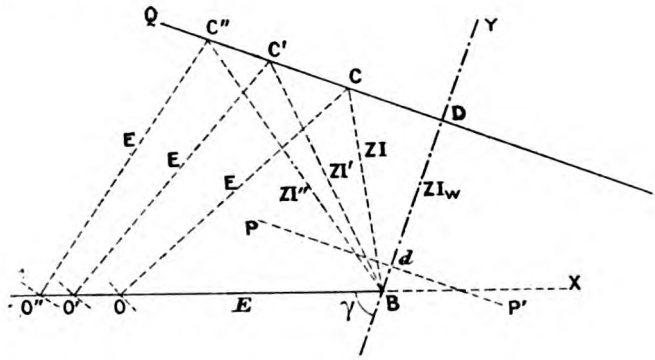


Fig. 17.

Si l'on porte les forces électromotrices en abscisses et les courants en ordonnées, on obtient des courbes en forme de V (*fig.* 18) indépendantes du bobinage inducteur et de la loi de saturation, grâce à l'hypothèse de $\mathcal{E}$ constant.

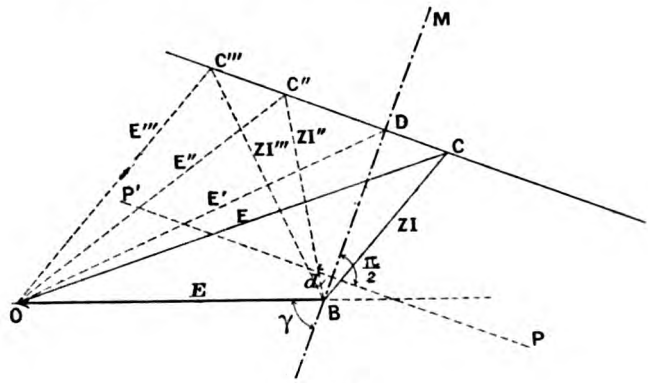


Fig. 17 *bis*.

Mais il est plus intéressant de prendre comme variable en abscisses, comme pour les moteurs synchrones, les ampères-tours excitateurs, sans distinguer s'ils sont en série ou en dérivation; cela revient à supposer une excitation séparée.

Ces ampères-tours se déterminent pour chaque valeur du cou-

rant alternatif I en mesurant sur l'épure (*fig.* 13) le segment CD correspondant qui indique le courant déwatté I_d, et en retranchant

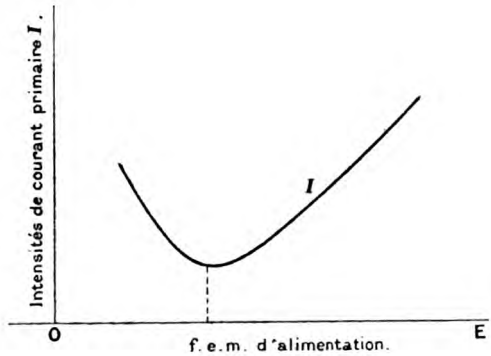


Fig. 18.

des ampères-tours à vide OM capables de donner la force électromotrice $\mathcal{E}$ les ampères-tours magnétisants produits par l'induit

$$A_a = \left(\frac{KN'}{\sqrt{2}}\right)$$

comptés avec le signe + ou le signe — suivant que I_d est positif ou négatif, c'est-à-dire que le point C est à droite ou à gauche de D.

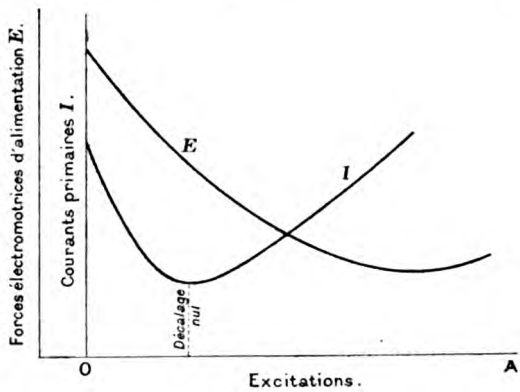


Fig. 19.

Si l'on porte les valeurs de l'excitation A ainsi déterminée en abscisses et les valeurs de I correspondantes en ordonnées, on

obtient une courbe en V dont la *fig.* 19 indique le schéma et dont le coude correspond au régime sans décalage. En portant aussi en ordonnées les valeurs de E correspondantes, on obtient une seconde courbe en V dont le coude est reporté beaucoup plus à droite, de sorte qu'elle se réduit dans la portion utile de l'épure à une branche descendante.

Ces courbes se prolongeraient à la gauche de l'origine, si l'on voulait considérer le cas d'excitations négatives. Pour chaque valeur de la puissance débitée on obtient une paire de courbes du même genre.

Limite supérieure du courant déwatté. — On a vu précédemment que le courant déwatté a une limite inférieure. Il a également d'après l'équation (23) une limite supérieure, celle qui rendrait l'excitation shunt nulle; car on ne peut songer à une excitation shunt négative; cette limite

$$i_0 = \frac{A_0\sqrt{2}}{KN} \tag{24}$$

doit être supérieure à la limite minima, à moins que le nombre de spires sur l'induit ne soit exagéré.

Mais en fait il n'y a pas besoin de limite supérieure du courant déwatté puisqu'on cherche à le prendre aussi faible que possible pour réduire les inconvénients qu'il produit dans la distribution, c'est-à-dire l'exagération de E.

Ce qui doit achever surtout de déterminer la valeur à choisir pour i_0, c'est la condition qu'entre la marche à vide et la marche normale, la variation de tension, qui détermine le jeu des enroulements inducteurs, soit celle qu'on a fixée pour l'exploitation et qui est représentée par la caractéristique d'alimentation définie plus haut.

Pour faire cette comparaison facilement, nous introduirons une notion commode, celle de la *caractéristique des décalages à tension constante du convertisseur.*

Caractéristique des décalages du convertisseur sous force électromotrice constante. — Supposons que, par un moyen quelconque, la tension aux balais du convertisseur soit maintenue constante; il en sera de même de l'excitation dérivée, proportion-

nelle à cette tension, ainsi que des ampères-tours totaux qui produisent ladite tension.

On aura donc :

$$A = \text{const.}, \qquad A_d = \text{const.};$$

et par suite

$$A_s + A_a = \text{const.}\,(A - A_d) \tag{28}$$

ou

$$\frac{\pi k n}{\sqrt{2}}(I_w - j_0) + \frac{KN'}{\sqrt{2}} I_d = (A - A_d). \tag{29}$$

Cette formule exprime tout simplement qu'à tension constante le transformateur peut fournir n'importe quel courant secondaire (proportionnel à I_w), qui traverse ses inducteurs en série, grâce à la réduction automatique du courant déwatté I_d qui prend de lui-même la valeur voulue pour rétablir toujours même force magnétomotrice totale A.

La relation entre $I_w - j_0$ et I_d est simplement linéaire. Si donc nous représentons (*fig.* 20) comme dans tout ce qui précède, sur

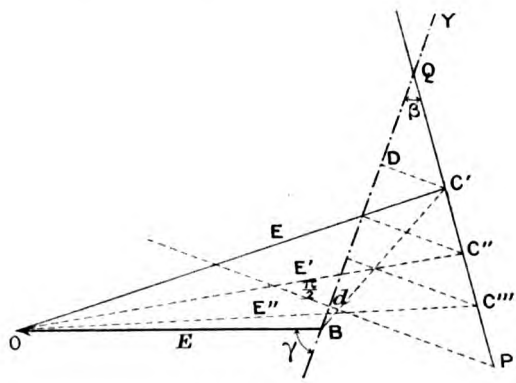


Fig. 20.

la droite de repère BY, les charges sous forme de segments proportionnels $dD = ZI_d$ et les courants déwattés correspondants I_d par d'autres segments proportionnels

$$DC = ZI_d.$$

Le lieu du point C, extrémité de ce dernier, est une droite QP ayant pour coefficient angulaire en Q

$$\text{tang}\,\beta = \frac{DC}{DQ} = \frac{\pi k n}{KN'}. \tag{30}$$

Ce coefficient ne dépend que des enroulements inducteur et induit. Cette droite se trace facilement en pratique en déterminant les points Q, à décalage nul, et P, à travail nul.

$$\text{En P}\begin{cases} I_w - j_0 = 0, \\ P_d = i_0 = \dfrac{A - A_d}{KN'}\sqrt{2}, \end{cases} \tag{31}$$

$$\text{En Q}\begin{cases} I_d = 0, \\ Qd = I_w - j_0 = \dfrac{\sqrt{2}}{\pi k n}(A - A_d). \end{cases} \tag{32}$$

Pour chaque valeur de $\mathcal{E}$, il existe une valeur de $A - A_d$; on la lit sur la caractéristique en traçant (*fig.* 16) par le point m correspondant à cette coordonnée la droite ma sous un angle δ par rapport à l'axe des A ayant pour coefficient angulaire la résistance de la spire moyenne du shunt,

$$\text{tang}\,\delta = r.$$

Donc à chaque valeur de $\mathcal{E}$ correspond une droite PQ plus ou moins éloignée du point d; mais *toutes ces droites sont parallèles,* ayant un même coefficient angulaire ρ qui ne dépend que des enroulements. Plus le nombre des spires de l'enroulement en série est réduit, plus évidemment le point Q s'éloigne de d sur la droite BY; quand l'enroulement en série n'existe pas (convertisseurs excités en simple dérivation), la droite PQ devient une parallèle à QY menée par P.

Inversement la réduction du nombre des spires sur l'induit éloigne le point P vers la droite sur la perpendiculaire dP.

Enfin l'augmentation ou la diminution des ampères-tours du shunt diminue ou accroît la différence $A - A_d$, et par conséquent rapproche ou éloigne la droite PQ du point d; elle passe par ce point quand $A_d = A$.

Caractéristique effective du convertisseur en charge. — Cela posé, rien n'est plus simple que d'étudier sur l'épure les va-

riations de la tension aux bornes du convertisseur en fonction de son débit; il suffit d'inverser le problème et de chercher quel est le débit correspondant à chaque tension comprise dans les limites où l'on prévoit que celle-ci peut varier.

Soient $\mathcal{E}$, $\mathcal{E}'$, $\mathcal{E}''$ une série de valeurs de la tension $\mathcal{E}$; on porte les longueurs correspondantes en BO, BO′, BO″ ... (*fig.* 21). De ces points O, O′, O″ on décrit des cercles avec E comme rayon, ou E, E′, E″ respectivement si l'on admet une force électromotrice d'alimentation variable, et l'on prend leurs points de rencontre C, C′, C″ avec les caractéristiques de décalage QP, Q′P′, Q″P″, correspondant respectivement à ces mêmes valeurs $\mathcal{E}$, $\mathcal{E}'$, $\mathcal{E}''$, ... Ces points définissent les régimes de courants I_w et I_d correspondants du convertisseur, et en particulier les charges dD, dD′, dD″. Si l'on a tracé d'autre part la caractéristique *demandée* point par point pour les mêmes valeurs de $\mathcal{E}$, $\mathcal{E}'$, $\mathcal{E}''$, la comparaison des deux courbes indique immédiatement les écarts entre les valeurs désirées et les valeurs réalisées par l'appareil.

L'inconvénient de cette construction est que les cercles coupent en pratique les droites PQ sous des angles très aigus et que les points de rencontre sont ainsi un peu incertains.

Pour faire la comparaison avec plus de précision par le calcul, il suffit de calculer I_w en fonction de $\mathcal{E}$ par les équations (2) et (29), c'est-à-dire

$$Z^2(I_d^2 + I_w^2) + 2\mathcal{E}(RI_w + XI_d) = E^2 - \mathcal{E}^2, \tag{2}$$

$$\left(\frac{\pi kn}{\sqrt{2}}\right)(I_w - j_0) + \frac{KN'}{\sqrt{2}} I = A - A_d. \tag{29}$$

Ces deux équations à deux inconnues I_w et I_d permettent d'éliminer I_d et de résoudre I_w en fonction de quantités connues $\mathcal{E}$ étant supposé déterminé préalablement; ce calcul, bien qu'un peu laborieux, ne présente aucune difficulté.

Sans tracer la courbe d'une façon rigoureuse, on peut aisément en prévoir l'allure dans les divers cas. Comme, d'après ce qui précède, l'inclinaison des droites de décalage PQ dépend du courant déwatté admis à vide i_0, on conçoit que le choix de celui-ci doit être fait en se préoccupant d'améliorer l'accord entre la courbe réelle et la courbe demandée. Nous allons examiner à ce point de vue les principaux cas pratiques.

Application au cas d'une excitation indépendante. — Supposons d'abord pour simplifier que l'excitation shunt soit remplacée par une excitation indépendante et constante : alors A_d est constant.

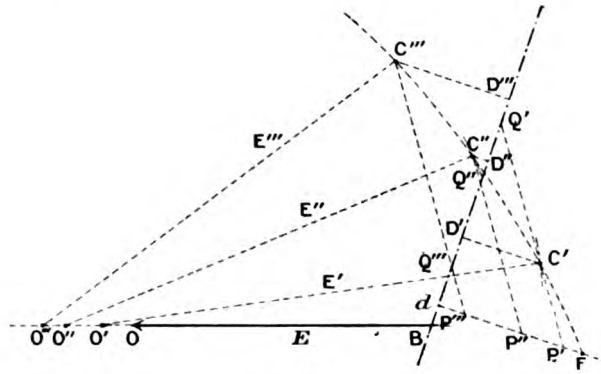


Fig. 21.

On voit immédiatement que si l'on n'ajoute pas d'enroulement en série, le convertisseur ne pourra donner que des tensions décroissantes quand la charge augmente. La caractéristique de déca-

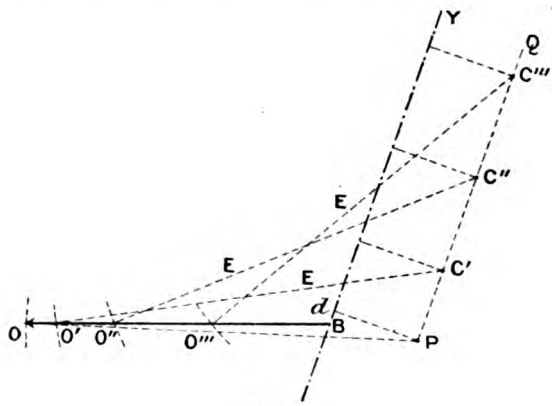


Fig. 22.

lage à toutes charges est en effet une droite PQ parallèle à BY (*fig.* 22) et, si l'on prend sur elle des points C'C'' qui vont en s'éloignant de P, les rayons constants E coupent l'axe BO en des

points O, O′, O″ qui se rapprochent de B; les tensions proportionnelles à OB vont donc en décroissant.

Donc quelle que soit la réactance et la force électromotrice extérieure choisie E, une excitation indépendante (ou *a fortiori* dérivée) ne peut maintenir la tension constante aux balais du collecteur à courant continu. Il va sans dire que la meilleure excitation dans ces conditions de marche à potentiel tombant serait celle qui annule le courant déwatté dP à toutes charges ; mais ce mode de fonctionnement est, je crois, sans grand intérêt pratique (¹).

Si l'on ajoute un enroulement en série, qui incline la droite PQ vers la gauche, les variations de $\mathcal{E}$ deviennent évidemment moindres. Cherchons la condition pour qu'elles se réduisent au minimum, c'est-à-dire pour que le convertisseur donne une tension pratiquement constante.

Il faudra évidemment que la caractéristique de décalage PQ se confonde le mieux possible dans les limites pratiques de charge avec un cercle décrit du point O correspondant à BO = E. Soit F (*fig* 23) le régime de marche à vide, G le régime moyen, M le régime de charge maxima. On pourra tracer une droite telle que ab coupant le cercle en deux points a et b intermédiaires à ces régimes, et qui s'écartera très peu du cercle dans tout l'arc d'emploi. Les segments dP et dQ lus sur l'épure détermineront les courants i_0 et I_w à vide et en charge normale, et les équations (31) et (32) permettront d'en déduire le nombre d'ampères-tours constants A_d à réaliser, ainsi que le nombre de spires n du circuit en série.

Les faibles écarts résiduels de la tension $\mathcal{E}$ s'obtiendront en traçant de tous les points de la droite PS des cercles de rayon E et prenant leurs intersections avec l'axe des tensions BO.

Le choix de la réactance X influe sur la précision de la régu-

---

(¹) On a proposé quelquefois d'employer la régulation à potentiel tombant pour les convertisseurs travaillant en parallèle avec des batteries d'accumulateurs, afin de faire débiter celles-ci aux fortes charges et se recharger aux faibles charges, mais il serait barbare d'être condamné ainsi à accepter des variations de voltage de 10 à 20 pour 100 sur le réseau, alors qu'on peut obtenir le même résultat à potentiel constant par des survolteurs automatiques adjoints à la batterie.

lation, en ce que plus l'arc de cercle FM, correspondant à une même variation de charge, a d'ouverture, plus il est difficile de le confondre avec une droite PS. Pour améliorer la régulation, on devrait donc réduire au minimum le segment $dD = ZI_w$ mesurant la charge maxima I_w et dans ce but réduire autant que possible la réactance (qui est le facteur le plus important dans la valeur de Z).

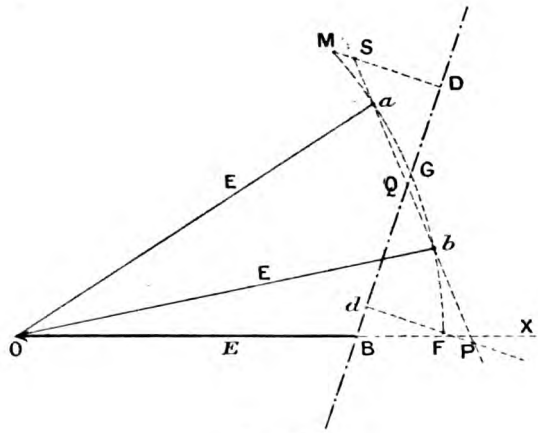


Fig. 23.

Mais, comme on l'a vu plus haut, celle-ci ne peut être réduite au-dessous d'une certaine valeur X_0 sans que cela force à accroître le courant déwatté à vide i_0. Il y a donc un juste milieu à prendre entre X_0 et zéro, qui dépendra des circonstances et de l'appréciation de chacun. En particulier on pourra réduire d'autant plus X que la charge du convertisseur sera plus régulière et qu'il marchera moins souvent à vide.

Pour hypercompounder la machine, on devra redresser davantage la droite PQ en remontant plus haut le point Q sur la droite BY; mais le principe reste le même, tracer la droite PQ de façon qu'elle se rapproche le plus possible en tous points de la caractéristique demandée, tracée tout d'abord.

Application au cas général de l'auto-excitation. — Dans le cas général de l'auto-excitation, la solution est peu différente, mais elle se trouve compliquée par le fait de la variation de l'exci-

tation shunt avec la tension. Au lieu de n'avoir affaire qu'à une seule droite de décalage PQ, on aura donc un réseau de droites parallèles correspondant à diverses valeurs de $\mathcal{E}$.

Dans le cas de la régulation à potentiel constant, la méthode de détermination des enroulements inducteurs et de la réactance du circuit reste exactement la même que dans le paragraphe précédent, puisque le shunt doit produire par hypothèse une excitation constante. Mais il faut tenir compte des petites variations de A_d dans le calcul final des écarts de tension dus à l'imperfection de la régulation :

Pour les valeurs de $\mathcal{E}$ inférieures à la valeur normale, l'excitation shunt se réduit d'elle-même, par conséquent la droite PQ se rapproche de *d* parallèlement à elle-même; elle s'écarte au contraire quand $\mathcal{E}$ augmente. Il est facile de voir sur la *fig.* 24

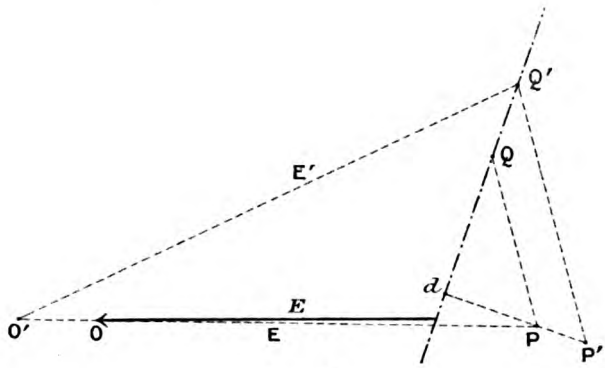


Fig. 24.

que cet effet tend à accroître les écarts par rapport à ce qu'ils sont avec une excitation dérivée constante.

Quand l'appareil doit être hypercompound, les deux régimes à vide et à charge moyenne sans décalage déterminent, comme plus haut, les ampères-tours, déwattés à vide A_0 et, par suite, les enroulements shunt et série.

Soient $\mathcal{E}$ et $\mathcal{E}'$ les valeurs de la tension correspondante à ces deux régimes, A_ε et A'_ε les ampères-tours correspondants d'après la courbe d'excitation; les lignes de décalage relatives à toutes les valeurs intermédiaires seront parallèles et comprises entre deux

lignes ayant pour équation l'équation (29), avec des seconds membres respectivement égaux à

$$A_\varepsilon - A_0 \quad \text{et} \quad A'_\varepsilon$$

et passant l'une par P, l'autre par P' (*fig.* 24).

Pour qu'il puisse y avoir effectivement hypercompoundage, c'est-à-dire $\mathcal{E}' > \mathcal{E}$, il faut que le point Q soit peu élevé sur la droite BY. Cela indique simplement qu'il faut soit un enroulement en série puissant, soit un grand courant déwatté à vide. C'est évidemment la première solution qui paraît préférable.

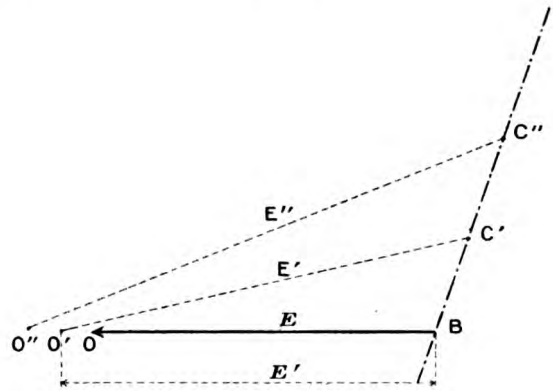


Fig. 25.

Mais comme, pour réduire $\mathcal{E}$, il y a toujours intérêt à incliner la droite BY vers la droite, on sera amené à accepter, dans le cas de l'hypercompoundage, d'accroître à la fois les deux éléments dont il s'agit.

Cas de la régulation de la tension d'alimentation par compoundage du générateur. — Comme on l'a dit plus haut, on peut théoriquement annuler à toutes charges le courant déwatté en alimentant le convertisseur par un alternateur convenablement compoundé qui donne une force électromotrice E croissant avec la charge de façon que le point C se déplace toujours sur la droite du repère BY pendant que $\mathcal{E}$ reste constant ou va en croissant suivant le but désiré. Comment devra être organisée l'excitation dans ce cas ?

Si le voltage est demandé constant $\mathcal{E}$, l'excitation sera évidemment en simple shunt, et sa valeur est aisée à déterminer par la condition qu'à charge nulle elle donne exactement le voltage $\mathcal{E}$, puisqu'il ne doit pas y avoir de courant déwatté.

Si l'on demande au contraire des tensions croissantes avec la charge, l'excitation doit être compoundée. L'enroulement shunt sera choisi encore de façon à donner à lui seul la force électromotrice $\mathcal{E}$ à vide, et l'excitation en série de façon à produire le supplément d'ampères-tours nécessaires pour réaliser la force électromotrice $\mathcal{E}'$ demandée sous la charge I_w.

Comme on l'a dit plus haut, dans ce cas de régulation, on doit chercher à réduire la réactance X et le décalage θ au minimum.

Cas de la régulation de la tension aux bornes par variation de la réactance du circuit X. — Les deux enroulements se déterminent de la même manière que dans le cas précédent, puisque la tension du courant alternatif à l'entrée est réglée encore de même par des actions extérieures sans décalage du courant à l'intérieur de la machine. L'excitation sera en simple shunt pour tension constante, compound pour tension croissante avec la charge; le shunt se déterminera par le voltage à vide, l'enroulement en série par la tension en charge.

Suppression possible de l'excitation shunt. — Rien ne force à employer une excitation indépendante ou shunt comme nous l'avons supposé jusqu'ici; car on peut toujours, en mettant assez de spires sur l'induit et réduisant l'entrefer, réaliser l'excitation nécessaire à vide par le seul effet de la réaction d'induit.

Les équations (21) et (22) se réduisent alors à

$$\frac{\pi k n}{\sqrt{2}}(I_m - j_0) = A_m, \tag{21 bis}$$

$$\frac{KN'}{\sqrt{2}} i_0 = A_0. \tag{22 bis}$$

Pas plus que l'excitation shunt, ce système ne permet de réaliser exactement une tension constante ou croissante sans inducteurs en série; il jouit un peu des propriétés d'autorégulation des

transformateurs, mais à un degré insuffisant par suite de la plus grande résistance du circuit magnétique.

D'autre part, la grande valeur qu'il faut alors donner au courant déwatté présente le très grave défaut de faire chauffer l'induit davantage en accroissant le courant total, et d'accroître le décalage du générateur, d'où réduction de puissance, grandes chutes de tension en ligne, etc., en un mot, tous les inconvénients ordinaires des forts courants déwattés; en outre, la commutation sans étincelle est moins bien assurée par suite de la réduction de l'entrefer.

Aussi ce procédé, après avoir été préconisé par la Société Westinghouse, est-il aujourd'hui délaissé; nous ne le citons que pour montrer la facilité avec laquelle on peut calculer l'excitation dans ces conditions aussi bien que dans les précédentes. Il a cependant un avantage, c'est de rendre le bon fonctionnement de la commutatrice plus indépendant de la forme de la courbe de la force électromotrice de la génératrice.

Conclusion. — On voit que le diagramme des moteurs synchrones, rapporté à deux axes, se prête par des extensions toutes naturelles à l'étude du convertisseur et permet d'en analyser les conditions de fonctionnement dans les cas les plus variés. Je serai heureux s'il peut aider à débrouiller et comprendre le problème fort complexe que soulève le régulation de ces machines, problème le plus compliqué, je crois, que soulève la machinerie à courants alternatifs.

La méthode que je viens d'exposer permet du reste non seulement de prévoir qualitativement les phénomènes, mais de les calculer numériquement en combinant les épures (ou les équations qui les traduisent) avec les données de l'expérience.

SOUS-SECTION B.

RENDEMENT LUMINEUX DE L'ARC A COURANT ALTERNATIF;

PAR MM. ANDRÉ BLONDEL ET JIGOUZO.

Dans un précédent Travail, dont la première partie fut présentée en 1896 au Congrès de l'Association française pour l'Avancement des Sciences (1) et la seconde publiée dans l'*Electrical World* du 13 février 1897, nous avons fait connaître les principaux résultats d'une étude sur le rendement de l'arc électrique à courants continus et alternatifs, exécutée en 1894 et 1895. Le but de la présente Note est de faire connaître avec plus de détails les résultats obtenus avec l'arc à courants alternatifs (2). Ceux-ci pourront présenter d'autant plus d'intérêt que l'on est resté pendant longtemps imparfaitement renseigné sur la valeur photométrique de cet arc. La plupart de ceux qui l'ont employé s'accordent à le trouver notablement inférieur à l'arc à courant continu, mais ils ne sont plus d'accord quand il s'agit de fixer la valeur du rapport; d'après le professeur Fleming, la différence serait de 50 pour 100; d'après le professeur Wedding, elle dépasserait 100 pour 100 du rendement de l'arc alternatif (3).

Cette incertitude tient à deux causes : d'une part, le manque complet de précision des méthodes employées en photométrie,

---

(1) *Voir* le *Bulletin de l'A. F.* et, pour plus de détails, le journal *L'Éclairage électrique* de 1896.

(2) Ce Travail a été exécuté au Laboratoire central d'Électricité de Paris, grâce à la bienveillance de la Société internationale des Électriciens, à qui nous exprimons notre sincère gratitude. Nous remercions aussi les fabricants de charbons cités dans cette étude, qui ont bien voulu nous confier des échantillons gracieusement.

(3) Toutes les expériences rapportées ici sont antérieures aux publications de M. Wedding, et nous n'avons donc pu contrôler celles-ci en les répétant.

pour la mesure de l'intensité moyenne sphérique; d'autre part, l'absence de coordination entre les données de fonctionnement des arcs étudiés. C'est ainsi que, dans un des meilleurs Travaux qui aient été publiés sur ce point, on a utilisé, pour dresser une seule et même courbe de rendement rapporté aux dépenses d'énergie, des expériences faites avec des arcs variant de 0 mm à 7 mm de longueur, sans tenir compte des variations énormes de lumière que produit une petite variation de l'écart.

Dans le présent Travail, ces causes d'erreur ont été autant que possible évitées.

D'une part, on a eu soin de faire plusieurs séries de mesures classées rationnellement suivant le diamètre des charbons, l'intensité du courant et la différence de potentiel aux bornes, la nature des crayons, etc. D'autre part, on a rendu les mesures à la fois précises et rapides par l'emploi du lumenmètre de M. Blondel, qui permet d'obtenir par une seule mesure l'intensité moyenne sphérique. On a pu ainsi multiplier beaucoup les mesures et chacun des chiffres qui ont servi à dresser les courbes données plus loin, est la moyenne de dix à vingt lectures faites à des intervalles rapprochés et concordant à moins de 10 pour 100 près, en général.

On a pris comme définition du rendement le rapport de la lumière totale produite à l'énergie dépensée. Cette lumière est entièrement utilisée pour l'éclairage des appartements; pour l'éclairage des espaces découverts, le flux lumineux émis au-dessus de l'horizon se trouverait perdu, mais on peut le récupérer presque entièrement par l'emploi d'un réflecteur du système Hélios ou d'un appareil dioptrique holophane; dans ces conditions, on utilise près de 90 pour 100 de la lumière totale ou même davantage. C'est donc bien celle-ci qu'il convient de mesurer.

Toutes les mesures ont été rapportées aux unités adoptées par le Congrès de Genève, et en particulier le flux au Lumen, l'intensité moyenne sphérique à la bougie Hefner, que, *pour simplifier* l'écriture, on désignera ici sous le nom abrégé de *pyr*.

La seule difficulté était de comparer la lumière bleue de l'arc à la lumière rouge de l'étalon Hefner; il peut y avoir de ce fait une légère incertitude dans la valeur absolue des résultats, mais non pas dans leur valeur relative, car on a eu soin d'employer

comme tare pendant toutes les expériences une source de même teinte que l'arc.

On n'entrera pas ici dans les détails sur l'organisation des expériences qui a été suffisamment décrite dans la première Partie citée plus haut, et l'on fera connaître seulement les résultats de ces recherches.

Pour faciliter la compréhension de ceux-ci, ils sont résumés sous forme de Tableaux (Tableaux I à VIII) et de courbes correspondantes (*fig.* 1 à 8) dont les ordonnées sont rapportées à deux échelles différentes, que chacun pourra employer suivant ses préférences; celle de gauche donne les flux lumineux, celle de droite les intensités moyennes sphériques correspondantes; quand on emploie un réflecteur, comme on l'a dit plus haut, il faut multiplier les premiers chiffres par 0,90 environ pour avoir le flux utilisé et les seconds par 1,80 pour avoir l'intensité hémisphérique.

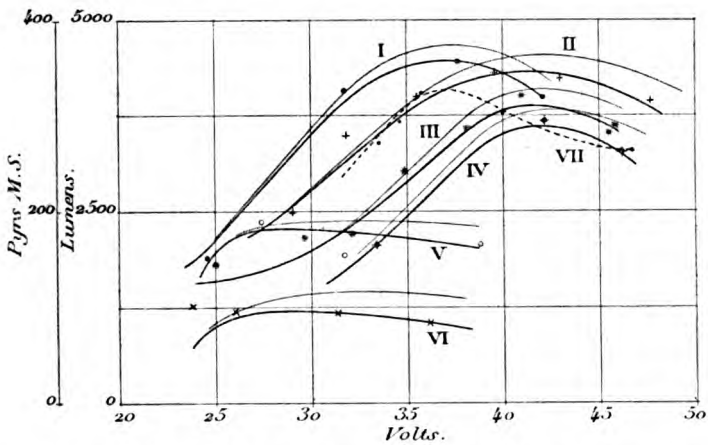


Fig. 1. — Variations du flux lumineux suivant le diamètre et l'écart des charbons pour des crayons de Nanterre sous le courant constant de 10 ampères. Les courbes I, II, III, IV, VII se rapportent au cas d'un crayon inférieur homogène, les courbes V et VI au cas de deux crayons à âme. (*Voir* Tableau I). Onde de courant sinusoïdal.

Nous avons fait varier, en général, pour chaque crayon et chaque intensité, la tension de façon à trouver celle qui était la plus avantageuse. C'est pourquoi les abscisses sont le plus souvent rapportées aux volts efficaces.

Ces résultats permettent de mettre en évidence l'influence sur le rendement des divers éléments suivants :

Diamètre des crayons,
Écart des charbons,
Nature des crayons,
Forme de la courbe du courant de l'alternateur et fréquence.

Influence du diamètre. — L'influence du diamètre est la même que pour l'arc à courant continu, c'est-à-dire qu'en augmentant le diamètre des charbons on réduit dans une énorme proportion le rendement lumineux obtenu.

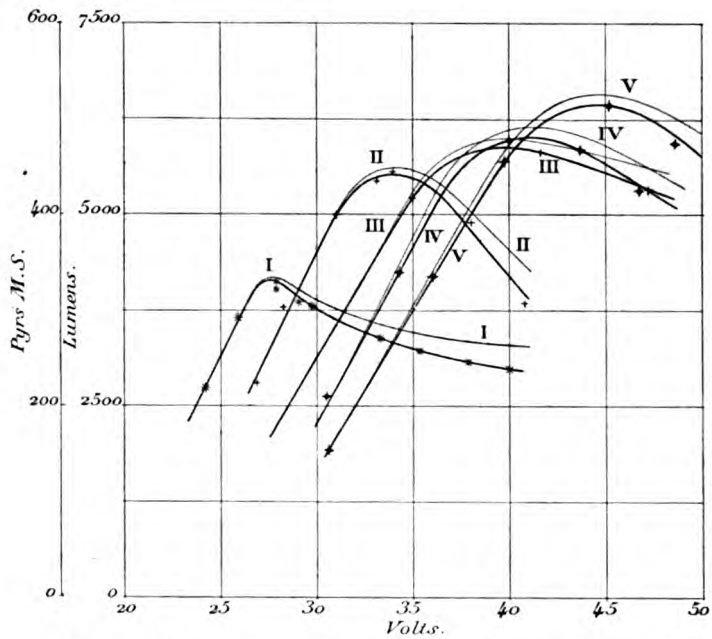


Fig. 2. — Courbes analogues à celles de la *fig.* 1, mais pour des charbons Siemens-Hélios, sous le courant constant de 10 ampères. Les courbes I, II et IV se rapportent au cas de deux crayons à âme, les courbes III et V à celui d'un crayon inférieur homogène.

Cet effet est bien visible sur la *fig.* 1 qui montre, par exemple, que des crayons de 14 mm au lieu de 10 mm ne donnent qu'un flux de 4500 lumens au lieu de 3600.

Cet effet se remarque sur toutes les courbes du reste, mais il est fâcheux qu'on ne puisse donner à cette loi une expression mathématique; il est vrai que certains auteurs, et en particulier Schreihage, ont cru pouvoir l'exprimer ainsi en disant que l'intensité lumineuse est inversement proportionnelle au diamètre, mais cette loi n'est malheureusement pas bien vérifiée par les résultats ci-joints, et elle ne tient pas compte de l'influence énorme de l'écart entre les charbons, dont on va parler.

Influence de l'écart. — L'influence de l'écart se mesure en même temps que celle de la tension, en déterminant le flux lumi-

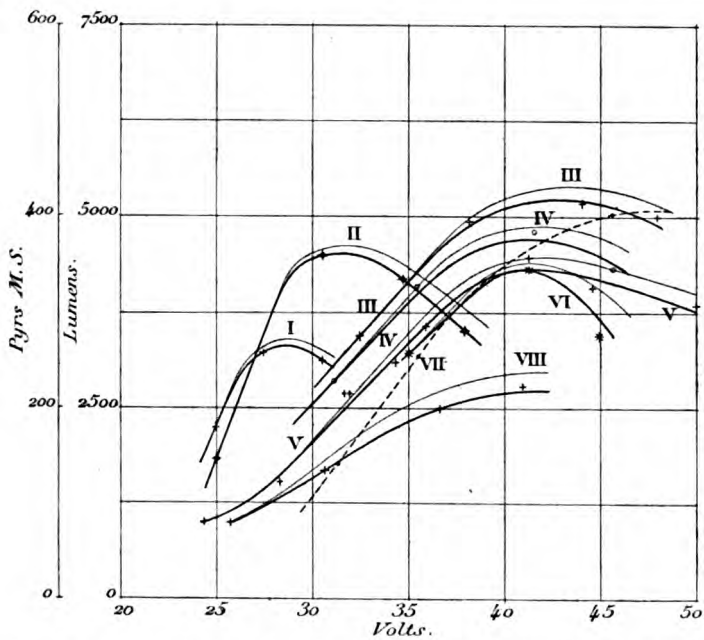


Fig. 3. — Courbes analogues à celles des *fig.* 1 et 2. La courbe VII se rapporte à deux crayons homogènes, les courbes II et V à un charbon à âme et un homogène, les autres à deux charbons à âme.

neux total produit, à intensité constante, avec diverses tensions aux bornes.

Les *fig.* 1, 2 et 3 présentent des courbes ainsi obtenues; sur la *fig.* 2 les écarts sont indiqués en millimètres. On voit que,

l'écart croissant, le flux va d'abord en augmentant jusqu'à un maximum, puis décroît ensuite très vite; il faut donc se garder d'augmenter trop l'écart si l'on veut avoir un bon rendement. Le rendement maximum sur chaque courbe correspondrait au point

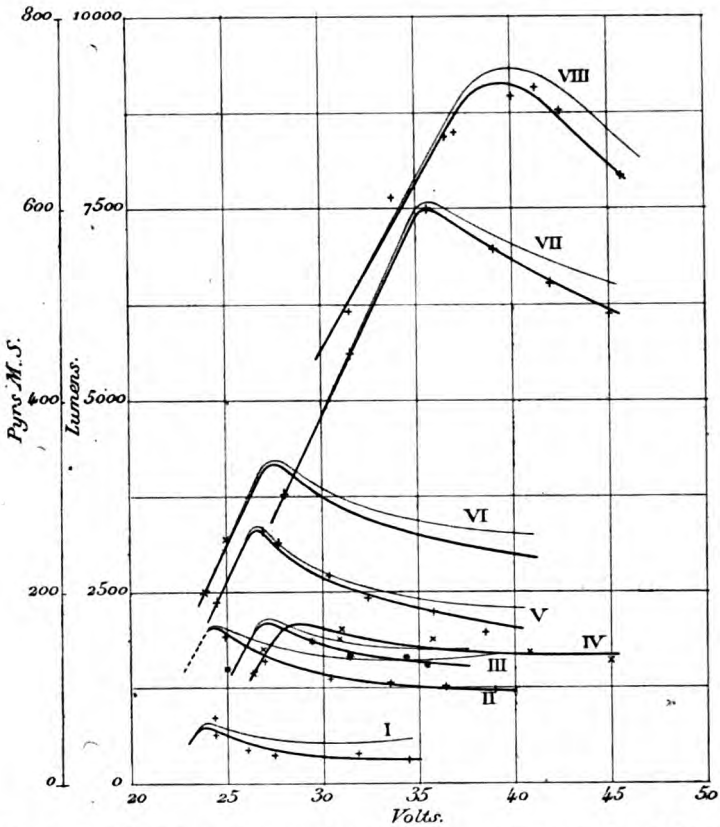


Fig. 4. — Courbes analogues, avec charbons à âme pour des régimes de 5 à 15 ampères.

de tangence de cette courbe et d'une droite menée par l'origine (0 lumen, 0 volt), parce que le rendement est le rapport du flux aux énergies, proportionnelles ici aux tensions, puisque le courant est constant. En fait, ce point diffère peu du point le plus haut de la courbe.

Influence de la nature des crayons. — Ces courbes montrent

que, suivant la nature des crayons, l'écart le plus avantageux est différent, et que la tension correspondant au rendement maximum est plus variable encore d'une qualité à l'autre.

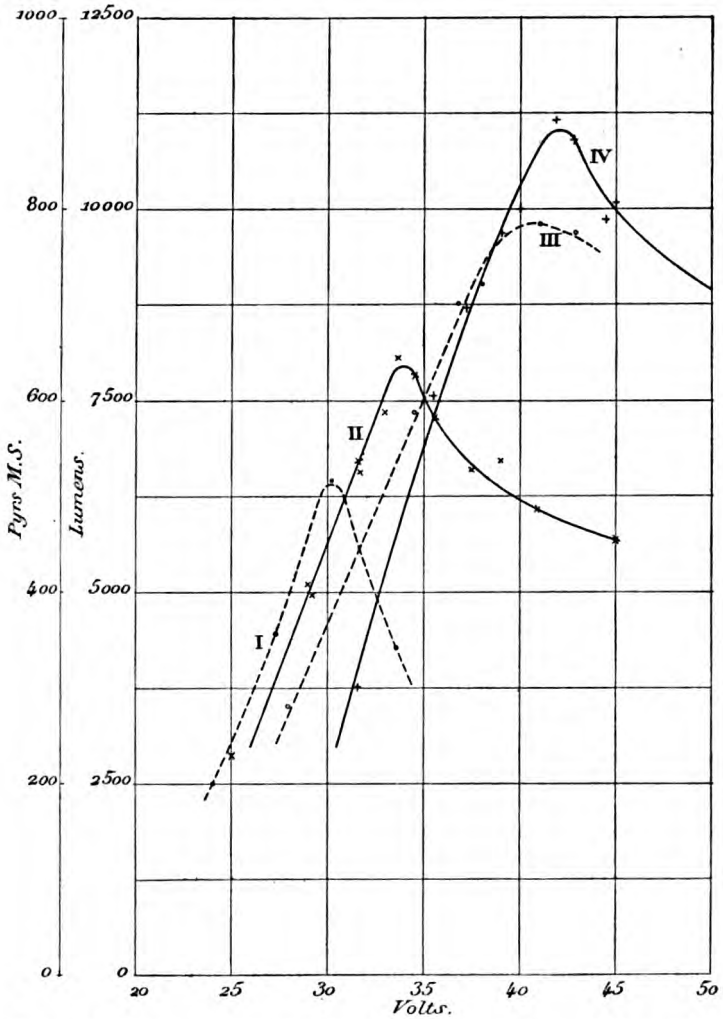


Fig. 5. — Régime de 15 ampères. Courbes I et II avec deux charbons à âme, III et IV avec homogène en bas.

Nous avons employé quatre types principaux de crayons :

Crayons de Siemens frères, de Charlottenbourg, que nous pre-

nons comme des étalons de fabrication normale (la marque Siemens ou la marque Hélios sont identiques).

Crayons de la Compagnie française de Nanterre, ordinaires.

Crayons des Phares français, marque Nanterre.

Crayons des Phares français, marque Carré.

Les deux premières qualités, qui étaient celles de l'industrie en 1896, présentaient leur maximum vers 28 volts; les deux autres vers 32 et 40 volts respectivement. Elles constituent à ce point de vue une espèce spéciale, surtout la dernière qu'on ne fabrique plus depuis la mort de M. Carré.

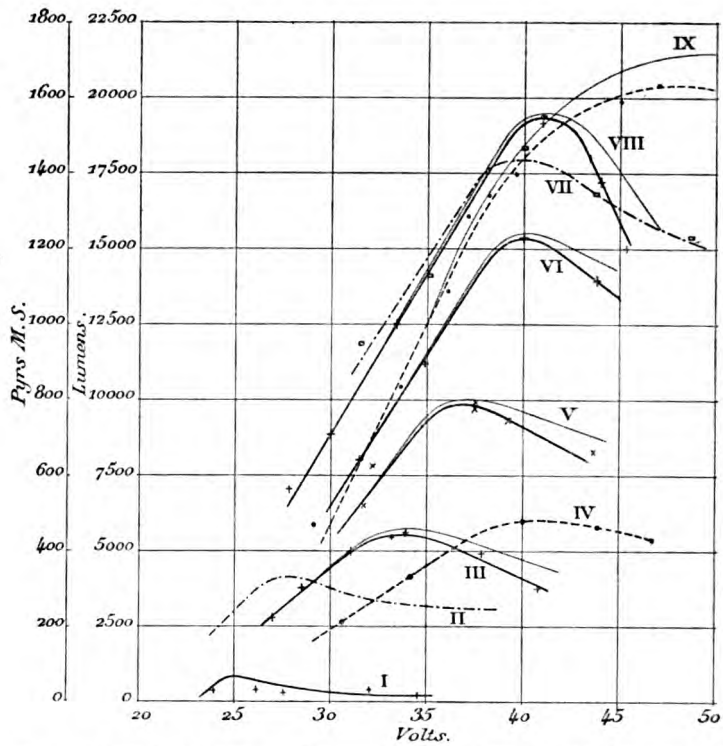


Fig. 6. — Influence de la valeur du courant pour des crayons constants (Nanterre phares, de 10 mm à âme en haut et homogène en bas; tension variable. Courants de 10 à 25 ampères.

De ces quatre qualités, il y en avait une qui était médiocre, c'était le charbon de Nanterre ordinaire qui, d'après la *fig.* 2,

ne donnait que $\frac{2}{3}$ environ du flux des charbons Siemens à dépense égale.

Les charbons des phares dépensent plus, mais donnent aussi plus de lumière, de sorte que leur rendement par watt est, en définitive, au moins aussi élevé que celui de Siemens. La *fig.* 6 montre comparativement les rendements en bougies par watt pour les trois qualités : Siemens-Hélios, Carré, Nanterre phares. C'est cette dernière qui l'emporte sur toutes les autres.

Ce n'est pas à dire qu'elle fût supérieure pour les applications industrielles ordinaires, car ces crayons crépitent souvent et se taillaient moins bien que la marque Siemens; mais nous ne signalons ici que la valeur photométrique.

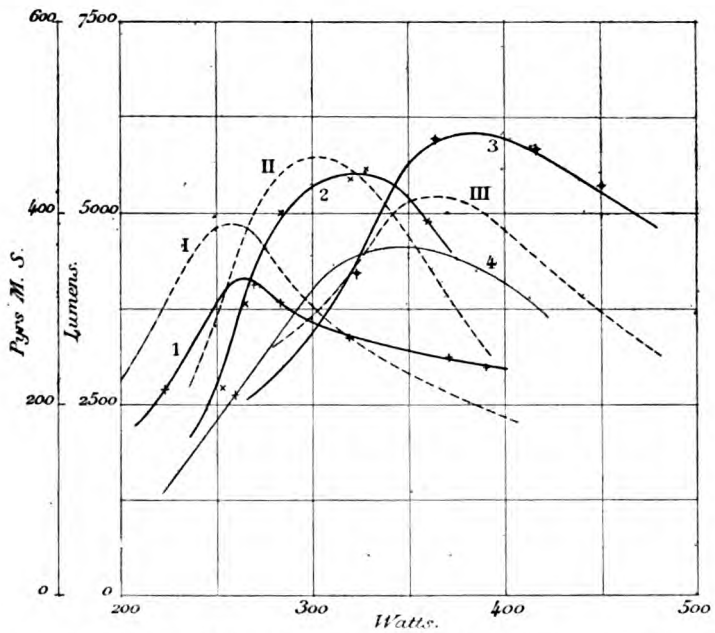


Fig. 7. — Rendement par watt correspondant aux charbons qui ont donné les rendements les plus élevés; diamètre commun : 10 mm haut et bas.

Influence de la mèche. — C'est un fait très curieux qu'on obtienne dans le cas de charbons à bas voltage, tels que l'Hélios et le Nanterre, un rendement bien meilleur avec un crayon inférieur homogène qu'en employant des crayons à mèche. Ce fait est très

nettement mis en évidence sur les *fig.* 1 et 2. Sur la première, on voit que le rendement est sensiblement doublé avec des crayons Nanterre de 10 et presque triplé avec des crayons de 14 par la simple substitution d'un crayon à mèche à un crayon homogène.

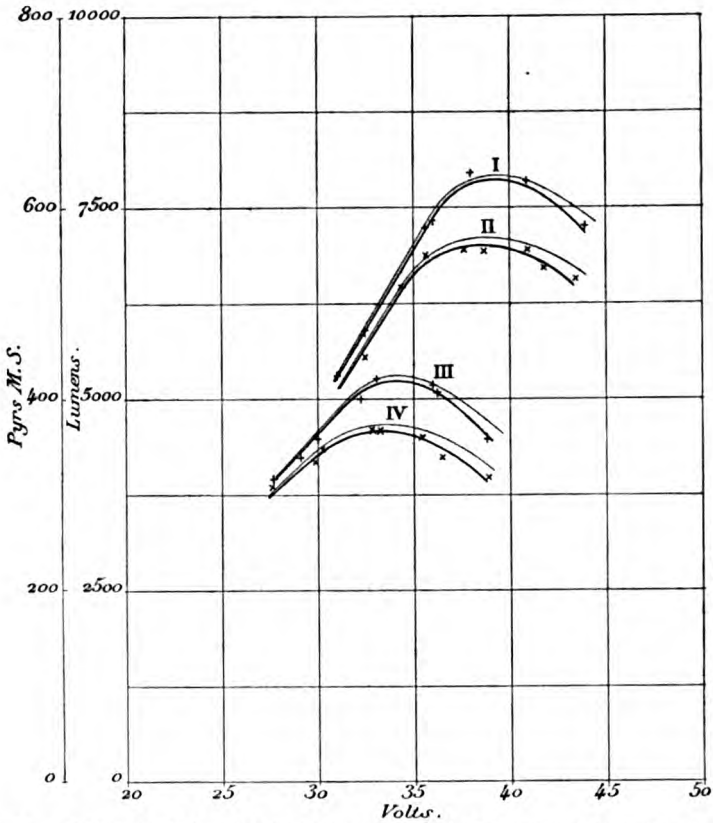


Fig. 8. — Influence de la tension aux bornes et de la fréquence, à courant constant (10 ampères) et à diamètre constant (10 mm); onde de courant rectangulaire.
Courbe I. — Crayons phares Nanterre à 27 périodes.
Courbe II. — » » 159 »
Courbes III et IV. — Mêmes conditions avec crayons Siemens-Hélios.

Avec les crayons *à tension élevée* type Phares (Nanterre et Carré), cet effet n'existe plus aussi nettement; on augmente bien le flux par l'emploi d'un crayon homogène, mais on augmente en même temps la dépense d'énergie, de sorte que le rendement reste finalement à peu près identique. C'est qu'en effet, comme nous l'avons

montré dans un travail antérieur ([1]), ces crayons sont à mèche dure et donnent déjà de très bons arcs, tandis que les crayons à bas voltage ont des mèches trop tendres qui ne permettent pas la réalisation d'un véritable arc électrique, mais seulement d'une sorte d'incandescence mixte à plus basse température.

A la suite de ces mesures probantes, l'emploi d'un crayon homogène en bas a été adopté pour l'éclairage à courants alternatifs de l'avenue de l'Opéra à Paris, et y donne toute satisfaction. Il est à recommander d'une manière générale.

Influence de la densité de courant. — Celle-ci est mise en évidence par les courbes de la *fig.* 9 qui ont été relevées sur des

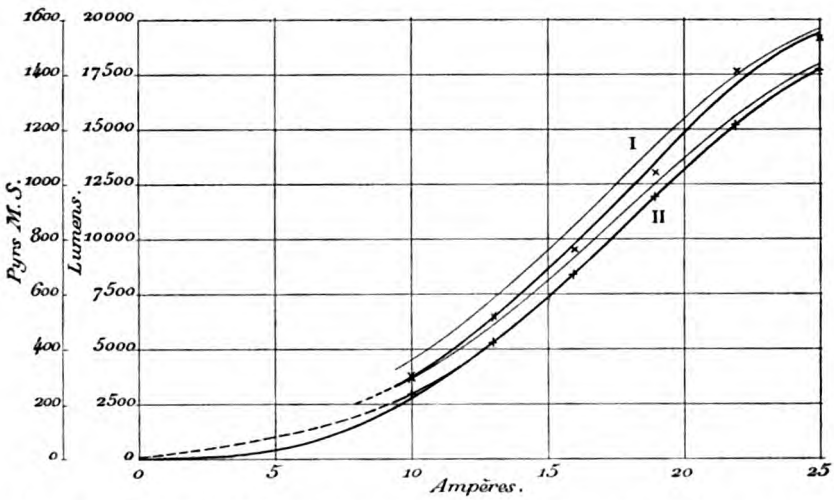


Fig. 9. — Variations du flux lumineux en fonction du courant pour des crayons de 10 mm à la tension constante de 41 volts.
Courbe I. — Crayons Nanterre des phares à âme.
Courbe II. — Crayons Siemens-Hélios à âme.

crayons toujours les mêmes en faisant varier seulement l'intensité du courant entre 0 et 25 ampères, tout en maintenant, d'autre part, le voltage constant à 41 volts. On remarquera qu'à partir de 20 ampères, sur cette figure, les courbes s'infléchissent, ce qui

([1]) A. Blondel, *Recherches expérimentales sur l'arc électrique à courants alternatifs* (*La lumière électrique*, décembre 1891 et septembre 1893).

provient d'une combustion excessive des pointes des crayons. Au-dessous de cette valeur qui est absolument exagérée, du reste, pour des crayons de 10 mm dans l'industrie, la courbe est sensiblement parabolique, ce qui prouve que le rendement augmente avec l'intensité du courant, ce qui n'a rien d'étonnant.

Influence de la forme de l'onde du courant. — L'influence de la forme de l'onde du courant sur le rendement de l'arc à courant alternatif n'est qu'un cas particulier d'une loi générale énoncée

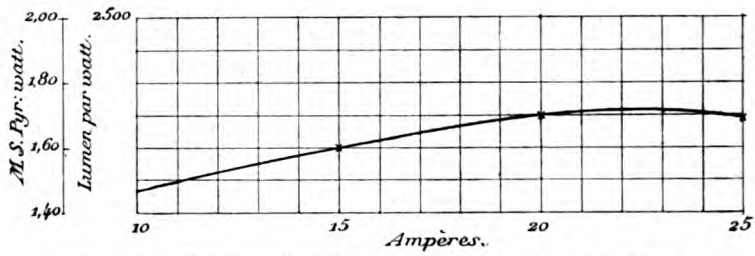


Fig. 10. — Rendement en fonction de l'intensité sous 41 volts.

il y a plusieurs années par l'auteur, à savoir que la température moyenne des pointes des crayons diminue quand la durée des extinctions de l'arc augmente; or, comme on l'a montré d'autre part (*loc. cit.*), l'arc s'éteint et se rallume suivant que la différence de potentiel aux bornes est inférieure ou supérieure à une certaine hauteur OA qui dépend de l'écart et de la nature des charbons; l'extinction est donc d'autant plus prolongée que l'intensité du courant varie plus lentement aux environs de ses zéros; elle sera très longue pour une courbe de la forme *fig.* 12 et atteindra au contraire son minimun pour une courbe ayant une forme rectangulaire (*fig.* 14, tracé pointillé).

Cette influence a été vérifiée expérimentalement par MM. Wedding et Rœssler [1]; mais l'énoncé que ceux-ci ont donné à leurs conclusions n'est pas tout à fait exact lorsqu'ils disent qu'il y aurait avantage à employer des alternateurs donnant une force électromotrice rectangulaire, car un semblable alternateur, lorsqu'il présente de la self-induction, peut donner des courbes de courant très arrondies (*fig.* 14).

---

[1] Cf. *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1896.

En réalité, ce qu'il faut considérer comme désirable théoriquement pour un arc, c'est un *courant* rectangulaire qu'on ne peut malheureusement réaliser en pratique. La meilleure preuve qu'il ne suffit pas de considérer la forme de la force électromotrice,

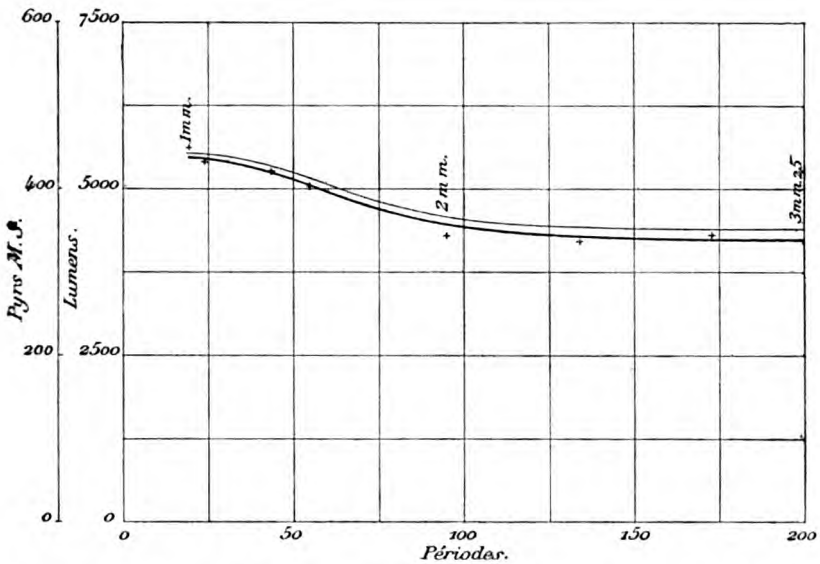


Fig. 11. — Influence de la fréquence sous un régime constant : crayons de 10 mm, Hélios, à âme, à 33 volts et 10 ampères; onde de courant rectangulaire.

c'est qu'en nous branchant sur un réseau dont les alternateurs ont une force électromotrice suivant *fig.* 12, mais beaucoup de self-induction, nous avons trouvé des rendements sensiblement égaux à ceux que donnait un alternateur à force électromotrice sinusoïdale. Cela provient tout simplement de ce qu'en pleine charge, le courant débité prend une forme analogue à la sinusoïde.

Pour le même motif, le fait que certains charbons homogènes tendent à déformer l'onde de la différence de potentiel à leurs bornes et à la rendre rectangulaire ainsi que je l'ai signalé dès 1893, et que M. Frith l'a retrouvé depuis, ne peut pas du tout permettre de conclure que le rendement de l'arc sera amélioré, car l'onde de *courant* ne se trouve pas sensiblement modifiée dans sa forme pour autant.

Nous avons mis, au contraire, en évidence l'influence de la

forme du courant en comparant les arcs obtenus avec un alternateur du type Labour à force électromotrice sinusoïdale (c'est-à-dire variant en fonction du temps suivant une loi sinusoïdale $e = E_0 \sin \omega t$) et avec un courant continu inversé périodiquement

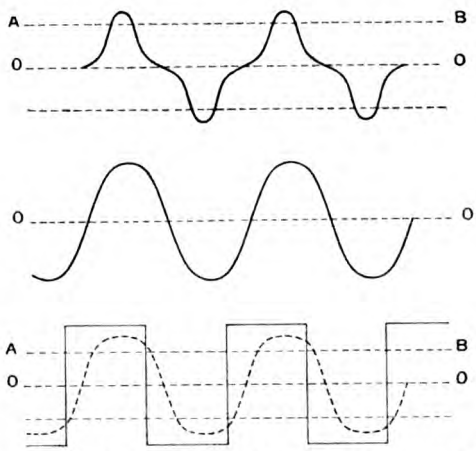


Fig. 12, 13, 14. — Différentes formes de courbes de force électromotrice.

à des intervalles très rapprochés. Ce courant a été réalisé à l'aide d'un commutateur à coquilles, tournant à vitesse réglable, permettant d'inverser le courant d'une batterie d'accumulateur 25 à 200 fois par seconde. On obtenait ainsi un véritable courant alternatif, comparable aux courants alternatifs ordinaires, mais présentant une loi de variation rectangulaire. Les résultats de cette comparaison sont résumés dans le tableau III et la *fig.* 3 : on voit qu'à intensité efficace égale (10 ampères), à tension égale (40 volts) et à fréquence égale (50 périodes), l'onde rectangulaire de courant donne 7900 lumens au lieu de 5900, soit une augmentation de $\frac{1}{6}$ sur le rendement lumineux. Cela provient de ce que la durée d'extinction de l'arc est réduite à zéro, au lieu qu'elle atteint facilement $\frac{1}{4}$ de l'alternance dans le cas du courant sinusoïdal.

Influence de la fréquence. — En faisant tourner le commutateur dont on vient de parler à différentes vitesses, nous avons pu réaliser des fréquences variées, allant de 25 périodes, limite où le papillotement de l'arc devient sensible, jusqu'à près de 200 périodes, limite imposée par la force centrifuge de l'appareil.

Nous nous attendions à trouver un accroissement de rendement avec la fréquence; mais il n'en a rien été; au contraire la *fig.* 3 montre que le flux *diminue* notablement *quand la fréquence augmente,* de 27 à 159 périodes, toutes choses restant égales d'ailleurs. La *fig.* 4 indique d'une manière plus complète l'effet de cette variation pour des crayons Hélios; le régime apparent étant constant (10 ampères, 33 volts), le flux total varie de 5400 à 4250 lumens, soit d'environ 20 pour 100 quand la fréquence passe de 25 à 200.

Cet effet doit être attribué, croyons-nous, à l'écart plus grand qu'on réalise entre les charbons pour une même tension aux hautes fréquences; dans l'expérience ci-dessus, il était de 1 mm à 25 périodes, 2 mm à 100 périodes et 3,25 mm à 200. Comme le rendement diminue avec les écarts croissants au delà d'une certaine limite, on conçoit que l'augmentation de fréquence puisse produire indirectement ce résultat.

Celui-ci n'a donc pas une signification absolue, et il est probable qu'en comparant des charbons dont les mèches seraient dosées différemment suivant les fréquences, de façon à reproduire un même écart à la même tension, l'effet avantageux apparent de la réduction de la fréquence serait annulé ou même remplacé par un effet défavorable. On trouve en effet qu'à écart constant le rendement croît un peu avec la fréquence.

On ne peut obtenir de bons arcs alternatifs avec deux crayons homogènes, du moins ceux que l'on emploie en Europe; en tout cas, les mesures photométriques nous ont montré qu'ils donnent de moins bons résultats qu'avec un crayon à âme.

Nous sommes arrivés à la même conclusion en employant des courants sinusoïdaux (dont les courbes ne sont pas données ici).

Conclusion. — Bien que ces expériences ne soient pas aussi complètes que nous l'aurions souhaité, elles suffisent à permettre de tirer quelques conclusions pratiques intéressantes.

1° Le rendement de l'arc à courant alternatif dépend dans une énorme mesure de la nature et du diamètre des charbons, de la densité de courant et de l'écart. Il est donc absolument nécessaire, lorsque l'on veut comparer différents arcs, de tenir compte de cette circonstance.

2° Il n'y a pas lieu de chercher à augmenter la fréquence des alternances; on doit du reste employer des charbons différents pour tirer le meilleur parti possible de deux fréquences aussi différentes que le sont les limites extrêmes 40 et 125 actuellement utilisées.

L'infériorité de rendement des petits arcs sur les gros fait que l'on doit préférer ceux-ci toutes les fois que cela est possible; on doit chercher également à réduire le diamètre autant que peut le permettre la considération de l'usure et, dans ce but, chercher à allonger autant que possible la course des lampes.

4° L'influence de la forme de la courbe de force électromotrice est à peu près insensible dans les limites où elle varie dans les alternateurs bien construits; c'est du reste la forme de l'onde du courant qu'il faut considérer plutôt; en la rendant rectangulaire, on accroît énormément l'utilisation; mais comme on ne dispose pas de moyens pratiques pour réaliser industriellement de semblables courants, ce fait n'a qu'un intérêt théorique.

TABLEAU I.

CHARBONS DE NANTERRE.

Tension aux bornes des charbons		Watts		Rapport des watts apparents aux watts vrais.	Moyenne des lectures photométriques.	Valeur du flux en lumens.	Fréquence en périodes par seconde.	Écart. en mm.	
seuls.	et de la résistance.	vrais lus au wattmètre.	apparents.						
—	—	—	—	—	—	—	—	—	
V.	V'.	W.	W'.	$\frac{W}{W'}$.	L.	F.	P.	E.	
				10 *âme*, 10 *homogène*.					
24,5	71,5	240	245	0,972	443	1530	42	0,25	
31,6	»	305	316	0,965	214,6	3260	»	1,5	
37,5	»	370	375	0,987	191	3550	»	4	
42	»	405	420	0,964	211	3210	»	4,5	
				10 *âme*, 10 *âme*.					
24,5	71,2	210	245	0,86	723	961	42	0	flamme violette
26,5	71,5	255	265	0,96	353	1920	»	1	
31,8	»	305	318	0,96	450	1510	»	3	
39	69,5	330	390	0,84	400	1690	»	6	

TABLEAU I (suite).

CHARBONS DE NANTERRE.

Tension aux bornes des charbons		Watts		Rapport des watts apparents aux watts vrais.	Moyenne des lectures photométriques.	Valeur du flux en lumens.	Fréquence en périodes par seconde.	Écart en mm.
seuls.	et de la résistance.	vrais lus au wattmètre.	apparents.					
V.	V'.	W.	W'.	$\frac{W}{W'}$.	L.	F.	P.	E.
				12 *âme*, 10 *homogène*.				
29	72,5	235	290	0,81	345	1990	42	0
31,8	»	260	318	0,82	240	2830	»	1
35,5	»	300	355	0,84	210	3230	»	1,5
39,5	»	340	395	0,86	197	3440	»	2,5
43	»	385	430	0,89	201	3392	»	5,5
47,5	»	425	475	0,85	213	3180	»	7
				12 *âme*, 12 *homogène*.				
33,5	71,5	300	335	0,89	255	2700	42	1
34,5	»	320	345	0,93	230	2950	»	1
35,5	»	336	355	0,947	210	3230	»	»
40	68,5	375	400	0,94	224	3030	»	4
47,2	72,5	445	472	0,94	255	2660	»	8
				14 *âme*, 12 *homogène*.				
25	68	210	250	0,84	461	1470	42	0
29,7	»	255	297	0,86	392	1730	»	»
32	»	250	320	0,78	377,2	1800	»	»
34,8	»	310	348	0,88	280	2420	»	1,5
38	»	340	380	0,89	234	2900	»	3
41	»	384	410	0,93	210	3230	»	4
45,5	»	420	455	0,92	238	2850	»	5,5
45,8	»	425	458	0,92	232	2930	»	6,5
				14 *âme*, 14 *homogène*.				
33,5	70	320	335	0,95	403	1680	42	1,5
42	»	400	420	0,95	230	2950	»	4
46,5	»	452	465	0,97	260	2610	»	8
				14 *âme*, 14 *âme*.				
26	70	240	260	0,92	650	1044	42	0,5
31,2	»	290	312	0,93	700	970	»	6,5
36,2	»	340	362	0,94	750	900	»	8

TABLEAU II.

Courants alternatifs, 10 ampères.

Tension aux bornes des charbons seuls.	Tension aux bornes des charbons et de la résistance.	Watts vrais lus au wattmètre.	Watts apparents.	Rapport des watts apparents aux watts vrais.	Moyenne des lectures photométriques.	Valeur du flux en lumens.	Fréquence en périodes par seconde.	Écart en mm.	Nature de la résistance en série.
V.	V'.	W.	W'.	$\frac{W}{W'}$.	L.	F.	P.	E.	
Charbons 10/10 *des Phares* (10 âme, 10 âme).									
27,5	74	254	275	0,927	309	2250	42	0	Résist. de self
28,3	73	265	283	0,939	222	3050	»	0	
31	72,5	284	310	0,918	170	4000	»	0	
33,2	73	320	332	0,963	155	4370	»	1	
34	72,5	328	340	0,964	151	4490	»	2	
38	71,5	359	380	0,945	172,2	3930	»	3	
Charbons 10/10 *Carré* (10 âme, 10 âme).									
30,5	70	260	305	0,852	324	2100	42	collage	Id.
34,5	70,5	322	345	0,933	202	3350	»	1	
40	70	365	400	0,912	141	4810	»	2,5	
44	71	416	440	0,945	143	4670	»	3,5	
46,8	70	450	468	0,963	158	4300	»	5	
Charbons 10/10 *Hélios*.									
24,5	68,5	225	245	0,918	315	2153	42	0	Id.
25	71	245	250	0,98	234,5	2890	»	0	
28	68	270	280	0,965	209	3240	»	1,5	
29,5	70	285	295	0,965	222	3060	»	»	
33,4	68,7	320	334	0,958	243,8	2700	»	3,5	
35,4	69,5	342	354	0,966	262	2580	»	5	
38	69	373	380	0,981	271	2500	»	5	
40	70	389	400	0,972	282	2390	»	6	
Charbons 10 *des Phares et* 10 *homogène*.									
27	67,5	276	270	0,837	464	1460	42	0	
35	69	315	350	0,90	162	4180	»	0,5	
41,6	68,5	387	416	0,93	145	4680	»	2,5	
47,1	67	440	471	0,934	158,6	4260	»	5	

TABLEAU II (suite).

Courants alternatifs, 10 ampères.

Tension aux bornes des charbons seuls.	Tension aux bornes des charbons et de la résistance.	Watts vrais lus au wattmètre.	Watts apparents.	Rapport des watts apparents aux watts vrais.	Moyenne des lectures photométriques.	Valeur du flux en lumens.	Fréquence en périodes par seconde.	Écart en mm.	Résistance.
V.	V'.	W.	W'.	$\frac{W}{W'}$.	L.	F.	P.	E.	
				Charbons 10 *Carré et* 10 *homogène.*					
30,5	71	240	305	0,787	448	1510	42	0	
36	70	310	360	0,849	203	3340	»	1	
39,8	70,5	358	398	0,895	147,5	4600	»	1,5	
44,9	70	410	449	0,915	130,8	5180	»	2,5	
48,5	70	448	485	0,926	142	4770	»	4	
				MÊMES CHARBONS QUE CI-DESSUS, MAIS AVEC UNE RÉSISTANCE OHMIQUE DANS LE CIRCUIT.					
				Charbons 10/10 *Carré.*					
31,5	70,5	250	315	0,794	»	»	»	»	
31,8	74	265	318	0,832	292	2320	42	0	
36,5	70	315	365	0,863	181,2	3740	»	1	Résist.
39,2	74,5	354	392	0,903	161	4210	»	2,75	ohmique
41,8	72	384	418	0,918	182	3720	»	4,5	
44,6	71,5	414	446	0,932	191	3550	»	5	
				Charbons 10/10 *des Phares.*					
27,5	70,5	231	275	0,84	318	2130	42	0	
31,9	69	300	319	0,94	156	4350	»	0,75	
34,5	70	310	345	0,965	158	4290	»	2,25	
38,5	72	342	385	0,95	169	4010	»	2,75	
40,8	71,5	375	408	0,98	191	3550	»	3	
44	69,5	405	440	0,986	201	3380	»	5,5	
				Charbons 10/10 *Hélios* (même courbe qu'avec la résistance de self).					
24,5	69	218	245	0,889	339	2000	42	0	
28,5	69	265	285	0,933	213	3170	»	1,5	
33,2	70	320	332	0,963	261	2600	»	3,5	
38	70	368	380	0,968	269,7	2520	»	5	

TABLEAU III.

Tension aux bornes des charbons		Watts		Rapport des watts apparents aux watts vrais.	Moyenne des lectures photométriques.	Valeur du flux en lumens.	Fréquence en périodes par seconde.	Écart.
après correction au cardew.	et de la résistance.	vrais lus au wattmètre.	apparents.					
—	—	—	—	—	—	—	—	—
V.	V.	W.	W'.	$\frac{W}{W'}$.	L.	F.	P.	E.
			Charbons de Nanterre, 10 *âme,* 10 *âme.* (Essayés le 3 janvier 1895. Bons résultats. Arc trop grand.)					
25	72	250	250	0,92	384	1770	42	0
27,5	»	250	275	0,90	262	2590	»	1
30,5	»	290	305	0,95	270	2510	»	1,5
			Charbons de Nanterre, 10 *âme,* 10 *âme.* (Essayés le 3 janvier 1895. Bons résultats.)					
32,5	73	280	325	0,86	245,4	2760	42	0
38	»	360	380	0,947	172	3940	»	1,25
44	74	410	440	0,93	163	4160	»	3,5
48	72,5	480	480	1	170	4000	»	5
			Charbons de Nanterre, 10 *homogène,* 10 *homogène.* (Charbons pour courant continu.)					
31,5	71,5	240	315	0,79	475	1430	42	0
35,5	»	270	355	0,76	313	2170	»	1
45,5	»	372	455	0,81	167	4060	»	»
			Charbons de Nanterre, 10,40 *volts;* 10 *homogène.* (Continu. Gros trou. Bas régime.)					
25	72	240	250	0,96	476	1420	42	0
30,5	»	300	305	0,98	187	3630	»	1
34,8	73	335	348	0,96	202	3350	»	3,5
38	71,5	360	380	0,95	240	2820	»	4,5
			Charbons du « Carbone », 10 *âme,* 10 *âme.*					
35	»	310	350	0,88	260	2610	42	0
41	»	390	410	0,95	195,4	3470	»	2,5
45	»	445	450	0,99	244,4	2780	»	6

TABLEAU III (suite).

Tension aux bornes des charbons après correction au eardew.	Tension aux bornes des charbons et de la résistance.	Watts vrais lus au wattmètre.	Watts apparents.	Rapport des watts apparents aux watts vrais.	Moyenne des lectures photométriques.	Valeur du flux en lumens.	Fréquence en périodes par seconde.	Écart.
—	—	—	—	—	—	—	—	—
V.	V'.	W.	W'.	$\frac{W}{W'}$.	L.	F.	P.	E.
Charbons de Berne, 10 âme, 10 homogène.								
31,1	69,8	280	311	0,90	300	2260	42	0
35,4	72	330	354	0,86	207	3280	»	1
41,4	70	392	414	0,95	173	3900	»	4
45,5	»	430	455	0,945	196,6	3450	»	5 à 6
Charbons de Berne, 10 âme, 10 âme.								
24,5	70	210	245	0,86	464	1460	42	0
29,5	»	280	295	0,95	284,5	2380	»	1,5
35,5	69	335	355	0,94	284	2390	»	5
39	»	370	390	0,95	294,5	2330	»	9
Charbons de Berne, 14 âme, 12 homogène.								
24,5	70	192	245	0,80	797	850	42	0
28,5	»	236	285	0,83	551	1230	»	0,25
31,8	»	262	318	0,82	313	2170	»	1
32	»	280	320	0,87	312	2170	»	0,75
34,5	»	300	345	0,87	278	2470	»	1
36	»	305	360	0,85	234	2890	»	1
41,2	»	365	412	0,88	188	3590	»	3
44,6	»	382	446	0,86	210	3230	»	4
50	»	422	500	0,84	220	3080	»	»
Charbons de Berne, 14 âme, 12 âme.								
25,8	70	250	258	0,95	812	835	42	0
30,8	»	270	308	0,87	491	1380	»	2,5
36,5	»	320	365	0,86	339	2000	»	4,5
41	»	360	410	0,87	303	2230	»	»

TABLEAU IV.

Alternateur Labour. — Courant alternatif (42 périodes).

1° RÉGIME DE 5 AMPÈRES.

Charbons Hélios 6/6.

Tension.	Intensité.	Flux.	Écart.
26,5	5	1415	0
27	»	1690	0,3
27	»	1780	0,5
31	»	1880	1
31,2	»	1950	»
35,5	»	1840	2
41	»	1660	5
44,8	»	1550	7

Charbons Hélios 10/10.

24,5	5	620	0
24,5	»	860	»
26,2	»	415	»
27,5	»	325	3
32	»	370	4,2
34,5	»	300	5,5

2° RÉGIME DE 8 AMPÈRES.

Charbons Hélios 10/10.

24,5	8	1490	0,2
29,5	»	1810	1,4
31,5	»	1680	2,3
34,5	»	1600	2,7
35,5	»	1520	3,8

3° RÉGIME DE 10 AMPÈRES.

Charbons Hélios 6/6.

Tension.	Intensité.	Flux.	Écart.
28	10	3840	0
31,5	»	5600	0,5
35,5	»	7500	2
39	»	6950	3
42	»	6490	5
44,8	»	6100	7

Charbons Hélios 12/12.

24,5	10	2380	0
28,2	»	2310	0,5
30,5	»	2700	1,3
32,5	»	2400	1,2
35,8	»	2220	3
38,5	»	2770	4,8

Charbons Hélios 15/15.

25	10	1910	0,8
27	»	1560	3,5
30,5	»	1340	5,4
33,5	»	1280	6,8
36,5	»	1200	7,8
39	»	1150	9,8

Pour *Hélios* 10/10 (10 ampères), *voir* Tableau précédent.

4° RÉGIME DE 15 AMPÈRES.

Charbons Hélios 10/10.

Tension.	Intensité.	Flux.	Ecart.
31,5	15	6140	0
33,8	»	7640	0,5
36,5	»	8490	1,2
37	»	8480	1
40	»	7700	3,2
41,5	»	7800	4,7
42,5	»	7500	5,2
45,5	»	6650	7,3

TABLEAU V.

Courant alternatif (42 périodes).

RÉGIME DE 15 AMPÈRES.

Charbons Siemens, 16 âme, 15 homogène.

Tension.	Intensité.	Flux.	Écart.
31,5	15	3760	0
35,5	»	7540	»
37,2	»	7480	1
39	»	9710	1,8
40	»	10000	2,6
42	»	11190	3,4
43	»	10930	4,2
44,7	»	9890	5,2
45	»	10105	5,7
49,3	»	9310	7,2
52,5	»	8480	8,5

Siemens A, 16 *âme*, 16 *âme*.

24,8	15	2460	0,3
27,2	»	4440	0,8
30,2	»	6490	2
33,5	»	4240	6,5

15/15 *Phares, âme, âme.*

Tension.	Intensité.	Flux.	Écart.
24,8	15	2820	0
29	»	5050	0,7
29,2	»	4990	0,8
31,6	»	6690	1,1
31,6	»	6570	1,2
33,8	»	8070	2,3
35,6	»	7290	4,2
37,5	»	6580	3,8
41	»	6110	7,3
45	»	5710	10

15 *Phares, âme.*
15 » *homogène tendre.*

29,3	15	3510	0
34,6	»	7380	1
35,8	»	8810	1,4
38	»	9020	3,4
41	»	9820	4
43	»	9750	5,5

Charbons Siemens 10/10 23 V.

Tension.	Intensité.	Flux.	Écart.
23,5	10	1600	0
24,5	»	2200	0,3
25,5	»	2440	1,5
26	»	2550	2
28	»	1920	3,3

TABLEAU VI.

Courbes de variation du flux en fonction du voltage à différentes intensités.

Intensité.	Tension.	Lectures.	Flux.	Écart.
	Charbons des Phares.			
25 ampères	27,8	122	5560	0
»	29,8	97	7000	»
»	33,4	67,5	10050	$\frac{1}{3}$
»	41	43,7	15520	»
»	41	44,5	15300	»
»	44,6	48,9	13870	6
»	45,2	56	11900	»
20 ampères	31,5	105,3	6460	0
»	34,8	74,6	8960	0
»	40	55,4	12240	1,75
»	44	61	11120	5
15 ampères	31,4	130	5220	0
»	32,2	107,7	6300	0
»	37,5	87,7	7770	0,25
»	37,5	85	7970	1,5
»	39,3	91,1	7430	3
»	43,8	102,3	6630	6
10 ampères	(*Voir* Tableau I.)			
	Charbons Hélios 10/10.			
25 ampères	31,4	72	9400	0
»	35,2	60,2	11270	»
»	40	46,6	14560	»
»	44	50,1	13570	»
»	49	54,5	12450	»
10 ampères	(*Voir* Tableau I.)			
	Charbons Carré 10/10.			
25 ampères	29	144	4710	0
»	33,4	82,3	8240	0
»	36	62,4	10870	1
»	37,2	52,4	12900	0,75
»	38,4	50,4	13460	0,75
»	39,8	48,3	14050	1
»	45,2	42,6	15920	6
»	47,3	41,6	16310	6,5

TABLEAU VII.

Flux en fonction du voltage à 10 ampères à deux fréquences différentes.

Tension aux charbons	Watts vrais	Watts apparents	Rapport	Moyenne des lectures photométriques	Valeur du flux en lumens	Fréquence	Moyenne des fréquences en périodes.	Écart
V.	W.	W'.	$\frac{W}{W'}$.	L.	F.	P.		E.
				1° *Charbons* 10/10 *des Phares.*				
31	300	310	0,97	160	4240	28	27	0,25
32,5	305	325	0,94	143	4720	25	»	0,25
35,7	345	357	0,96	116,5	5820	26	»	0,5
36	350	360	0,97	116	5850	28	»	0,5
38	365	380	0,96	108	6360	28	»	1
41	395	410	0,96	110	6280	28	»	1,5
44	440	440	1	117	5790	24	»	3,5
32,5	305	325	0,93	152	4460	170	159	0,5
34,5	335	345	0,97	130	5220	154	»	0,5
35,7	345	357	0,96	122,2	5550	152	»	1,5
37,8	362	378	0,96	122	5560	156	»	1,5
38,8	372	388	0,96	122	5560	166	»	2,25
41	395	410	0,96	123	5540	156	»	2,5
42	405	420	0,96	126,5	5360	164	»	2,75
43,5	415	435	0,97	129	5260	156	»	4
				2° *Charbons* 10/10 *Hélios.*				
27,5	250	275	0,91	213,6	3170	20	23,5	$\frac{1}{8}$
29	265	290	0,92	199	3410	20	»	$\frac{1}{6}$
30	270	300	0,90	187,8	3610	24	»	0,25
32,2	295	322	0,91	169	4010	28	»	1
33	300	330	0,91	160	4240	22	»	1
36	325	360	0,90	163	4160	24	»	1,75
36,2	325	362	0,89	165,7	4090	22	»	1,5
38,9	345	389	0,89	189	3590	28	»	2,5
27,5	240	275	0,84	221	3070	158	162	$\frac{1}{6}$
29,8	268	298	0,90	201	3370	150	»	1
30,4	270	304	0,88	195,6	3460	172	»	1
32,8	292	328	0,89	185	3660	155	»	2
33,2	300	332	0,90	184,4	3680	170	»	1,25
35,5	315	355	0,89	189	3590	170	»	2,25
36,5	320	365	0,88	201	3390	168	»	3
39	350	390	0,89	214	3170	160	»	3,5

TABLEAU VIII.

Flux en fonction de l'ampérage à 41 volts.

Tension.	Intensité.	Lectures.	Flux.	Écart.
		Charbons des Phares 10/10.		
41	25	43,7	15520	0
»	22	47,5	14200	3
»	19	65	10440	4
»	16	88,8	7640	4,5
»	13	130	5220	5
»	10	224	3030	6
		Charbons Hélios 10/10.		
41	25	47,7	14230	2,25
»	22	56	12110	2,5
»	19	71,3	9510	3,25
»	16	101,7	6670	5,5
»	13	159,2	4260	6

TABLEAU IX.

Rapport du flux hémisphérique inférieur au flux total.

Courant alternatif.

Charbons.	Tension en volts.	Courant en ampères.	Lectures au photomètre pour le flux hémisphérique inférieur.	Lectures au photomètre pour le flux total.	Rapport.
14/12 Nanterre...	33	10	541	280	51,7
» » ...	40,5	»	478,9	210	44
12/12 » ...	34,5	»	416	210	50,4
» » ...	38,5	»	335	197	59
10/8 » ...	33	»	192	105	54,6
14/12 Berne.....	33	»	406	277,8	68
» »	40	»	422	218	51,6
				Moyenne.....	54,2

Rapport : $\frac{54,2}{100}$ environ.

RENDEMENT COMPARATIF DES ARCS A COURANTS CONTINUS ET ALTERNATIFS;

PAR MM. ANDRÉ BLONDEL ET JIGOUZO.

Dans les essais que nous avons publiés précédemment nous avons étudié séparément les rendements des arcs à courants continus et à courants alternatifs en cherchant à mettre en évidence pour chacun d'eux l'influence des différents éléments du régime, écart, voltage, densité de courant, diamètre et nature des charbons.

On pourrait déduire de ces résultats une comparaison entre les rendements des deux catégories d'arcs; mais il y aurait à craindre pas mal d'erreurs résultant des différences entre les natures des crayons, qui ont pu varier d'une série à l'autre. En outre les régimes étudiés se sont écartés souvent des régimes usuels pour les besoins de la démonstration.

Il nous a donc paru plus sûr, pour donner à cette comparaison si importante une base à la fois solide et pratique, d'exécuter une série générale d'essais faits dans des conditions rigoureusement comparables (dans l'année 1897).

Tout d'abord nous avons décidé de n'opérer que sur une même marque de charbons, facile à trouver partout, et qu'on puisse considérer comme un étalon de la meilleure qualité. Nous avons ainsi adopté les charbons Siemens marque A, la même pour courants continus et pour courants alternatifs. Ces échantillons ont été mis gracieusement à notre disposition par la maison Siemens frères.

Beaucoup de fabricants, pour racheter l'infériorité de l'arc à courants alternatifs, indiquent pour celui-ci des diamètres de crayons plus petits que pour l'arc à courant continu; la comparaison se trouve ainsi faussée. Nous avons posé au contraire en principe, pour maintenir la balance égale, que l'on emploierait même densité de courant efficace pour les courants alternatifs que pour les courants continus, ce qui entraîne sensiblement même usure des crayons.

Nous avons eu ensuite à choisir pour les divers arcs la densité de courant et le voltage; nous avons pensé que, eu égard aux causes

extérieures d'échauffement pour l'arc, il était rationnel de prendre la même densité de courant aux divers régimes, c'est-à-dire proportionner la section au courant I [1] (diamètre proportionnel à la puissance $I^{\frac{1}{2}}$). On aurait pu, il est vrai, la faire croître moins vite comme l'indiquent la plupart des constructeurs. Mais en fait les chiffres usuels indiqués se rapprochent sensiblement de la loi de proportionnalité de I à d^2 et sont du reste assez peu con-

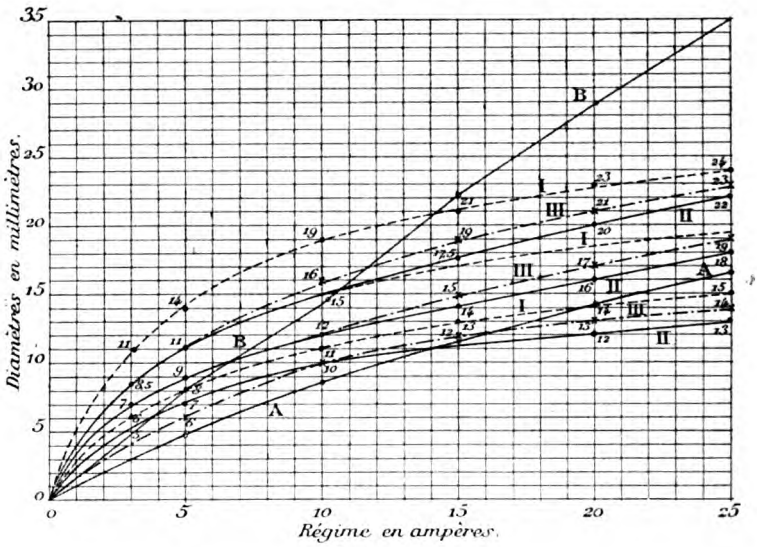


Fig. 1.

cordants. Nous les avons résumés par un graphique (*fig.* 1) relatif aux courants continus.

---

[1] Si l'échauffement ne provenait que du passage du courant dans les crayons, il serait rationnel d'augmenter la densité de courant Δ avec la section parce que la chaleur dégagée par unité de longueur est proportionnelle au rapport des carrés du courant et du diamètre d :

$$W = A\rho \frac{I^2}{\pi d^2},$$

tandis que la surface de refroidissement est proportionnelle à d. Pour que les deux éléments soient proportionnels, il faut donc que Δ varie proportionnellement à $\sqrt{d}$ ou I proportionnellement à $d^{\frac{3}{2}}$. Des diamètres en chiffres ronds satisfaisant sensiblement à cette loi donneraient lieu à la ligne représentative B, qui indique une augmentation bien plus rapide que celle admise d'ordinaire.

Les trois courbes en pointillé I indiquent les valeurs moyennes employées en Allemagne, d'après M. Heim, pour les charbons inférieur et supérieur s'ils sont inégaux ou pour les crayons égaux (courbe moyenne). Les trois courbes en traits pleins II se rapportent aux régimes indiqués par des constructeurs français. Enfin les courbes en traits mixtes III sont celles que nous avons adoptées

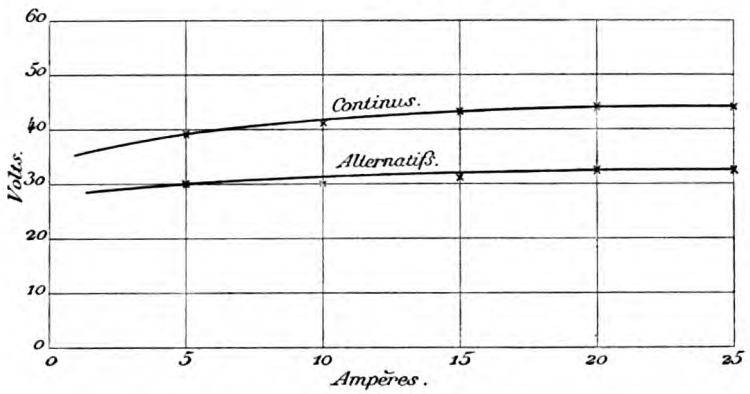


Fig. 2.

comme les données moyennes, très voisines de celles indiquées par Siemens, ainsi que le montre le Tableau ci-dessous.

La *fig.* 2 indique la loi des tensions d'après ce catalogue. Ce sont ceux qui assurent la taille correcte et la bonne forme des pointes des charbons Siemens.

1° *Courants continus.*

Intensité du courant.	Diamètres indiqués par Siemens.	Diamètres adoptés par nous d.	Valeurs de $d^{\frac{3}{2}}$.	Tensions aux bornes, indiquées par Siemens.	Tensions aux bornes, correspondant au rendement maximum.
2	9/6	»	»	34	»
3	11/7	»	»	36	»
4 1/2	13/8	»	»	37	»
5	16/10	11/6, 9/9	27	38	50
10	18/12	16/10, 12/12	42	40	50-52
12	20/13	»	»	41	»
15	22/14	19/12, 15/15	58	43	50
20	22/14	21/13, 17/17	70	44	48-50
25	24/15	23/14, 19/19	83	44	50-51

2° *Courants alternatifs.*

Intensité du courant.	Diamètres indiqués par Siemens.	Diamètres adoptés par nous d.	Valeurs de $d^{\frac{3}{2}}$.	Tensions aux bornes indiquées par Siemens.	Tensions aux bornes correspondant au rendement maximum.
4-5	8	8	23	30	40
6	9	»	»	30	»
9-11	10	12	42	30	40
12	12	»	»	30	»
15	14	15	58	31	40
20	16	17	70	32	39-40
25	17	19	83	32	39

On voit, d'après la courbe des valeurs d^2 correspondant aux diamètres (égaux) que nous avons adoptés, que nous avons sensiblement satisfait à la loi de *densité de courant constante*. Nos régimes forment ainsi une série rationnelle. Les résultats ont justifié ce choix comme on va le voir en nous donnant une loi sensiblement linéaire pour la puissance lumineuse.

Cela posé, pour chaque paire de crayons, nous avons tracé la courbe complète du flux en fonction de la tension, de façon à déterminer le flux maximum aussi bien que le flux au régime normal.

Les *fig.* 3 et 4 donnent ces courbes respectivement pour les arcs continus et alternatifs; pour les premiers il y a deux courbes pour chaque ampérage, l'une pour charbons inégaux, l'autre pour charbons égaux. Ces derniers sont employés aussi dans les arcs alternatifs respectivement pour les mêmes intensités de courant.

Les Tableaux I et II donnent les chiffres qui ont servi à dresser ces courbes.

Celles-ci montrent tout de suite la supériorité de rendement de l'arc à courant continu. Pour achever la comparaison, nous en avons déduit deux autres groupes de courbes (*fig.* 5 et 6) donnant les intensités moyennes sphériques et le flux en fonction de la puissance électrique, soit au régime du rendement maximum, soit à la tension normale indiquée plus haut comme chiffre usuel. On a admis pour l'arc alternatif un facteur de puissance moyen $\cos\varphi = 0,95$.

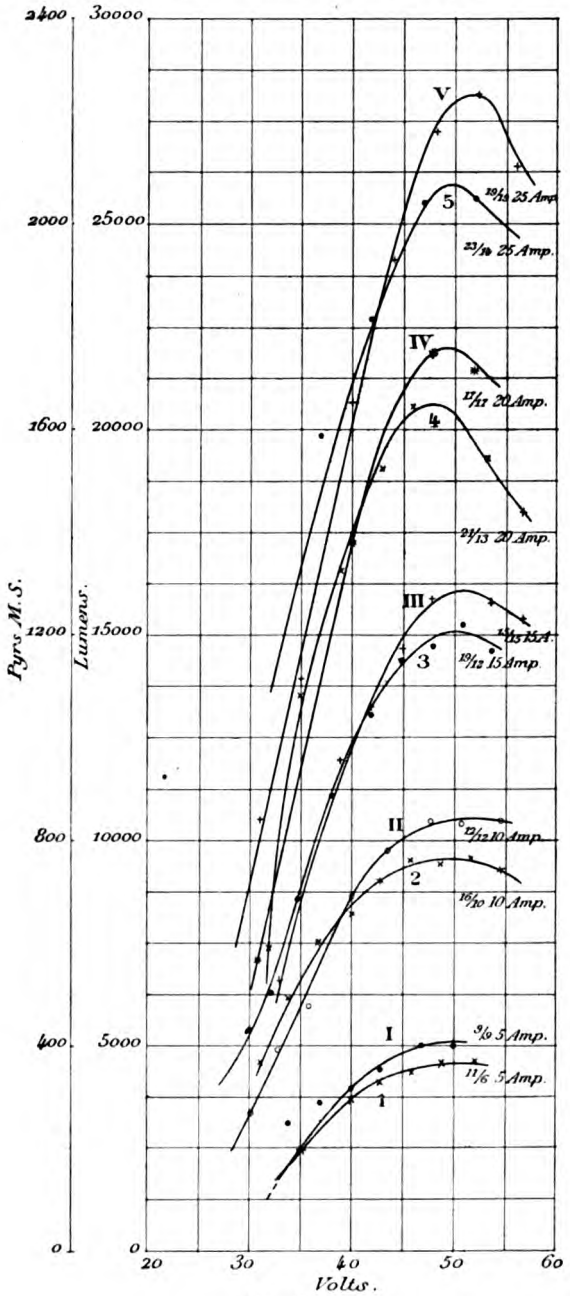

2400
2000
1600
1200
800
400
0
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
Pyrs M.S.
Lumens.
20
30
40
50
60
Volts.
V
5
IV
4
III
3
II
2
I
1
20/12 25 Amp.
23/10 25 Amp.
17/11 20 Amp.
24/13 20 Amp.
14/15 15 A.
19/12 15 Amp.
17/12 10 Amp.
16/10 10 Amp.
9/6 5 Amp.
11/6 5 Amp.

Fig. 3.

En traçant ces courbes, on trouve pour les courants continus au delà de 250 watts sensiblement deux droites passant par l'origine, et les points correspondant au maximum de flux s'y placent aussi bien que ceux correspondant à la tension normale; d'où une grande simplification. Au-dessus de 250 watts on a sensiblement, en désignant par I l'intensité lumineuse moyenne sphérique, F le flux, W la puissance en watts

$$I = 1,75\,W,$$
$$F = 22\,W.$$

Les crayons à basse tension (marque Siemens 23 volts) donnent, d'après notre publication sur l'arc à courant continu, des rendements sensiblement égaux ou plutôt un peu inférieurs.

Pour l'alternatif avec 2 crayons à mèche, il en est tout autrement. Les régimes normaux donnent des rendements inférieurs de 30 pour 100 et même davantage aux rendements maximums. En outre, les points se placent non plus sur des droites mais sur des courbes paraboliques. Cependant on peut encore, en réduisant le charbon du régime de 25 ampères à 18 mm seulement, réaliser pour la loi pratique relative aux voltages usuels un tracé (pointillé) sensiblement rectiligne et passant par l'origine, dont l'équation est

Hefners (m. sph.)..... $I = 0,9\,W$ (watts)
Lumens..... $F = 11,30\,W$ (watts)

Le rendement n'est donc guère plus de moitié de celui de l'arc à courant continu, dans les conditions de parfaite justice comparative où nous nous sommes placés.

On ne peut guère songer à employer, d'autre part, les régimes de maximum, car les courbes nous indiquent que la tension correspondante est de 40 volts environ, ce qui, pour des arcs de ce genre entre charbon à mèches, conduirait à des écarts fort exagérés. Aussi les constructeurs indiquent-ils des diamètres plus petits que les nôtres, mais c'est au détriment de la durée et la balance se trouve ainsi faussée. Il nous paraît plus rationnel de recourir à l'emploi d'un charbon inférieur homogène; comme nous l'avons indiqué, le rendement est ainsi augmenté de $\frac{1}{3}$ environ, et l'on peut admettre par conséquent pour ce cas la formule empirique

Hefners (m. sph.)..... $I = 1,2\,W$ (watts)
Lumens..... $F = 15\,W$ (watts)

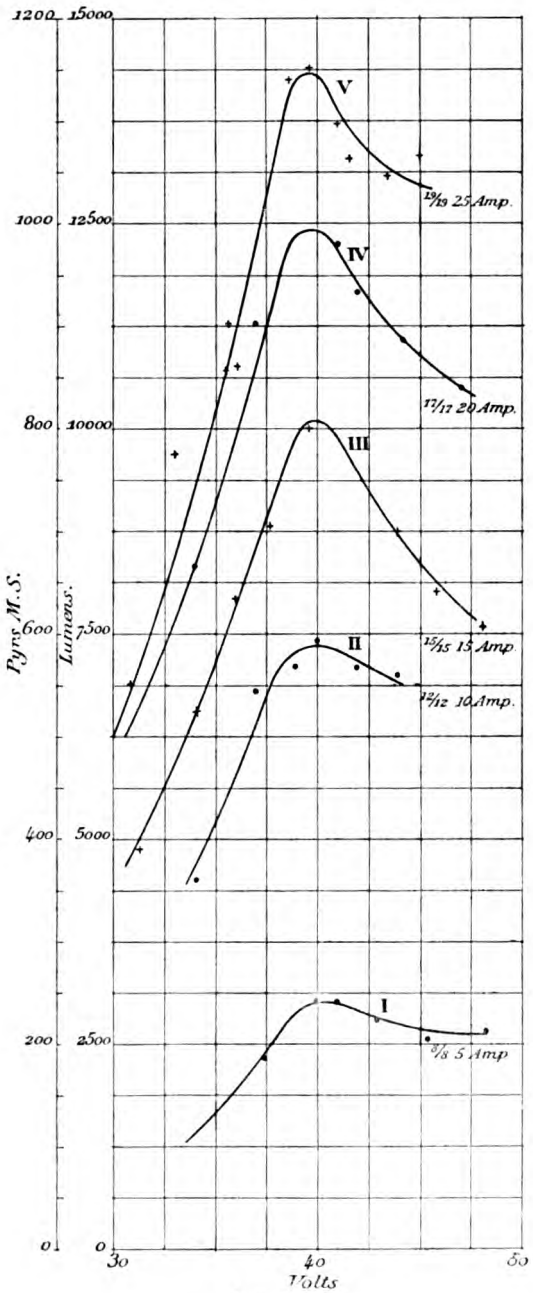

1200
1000
800
600
400
200
0
15000
12500
10000
7500
5000
2500
0
Pyrs. M.S.
Lumens.
V
IV
III
II
I
19/19 25 Amp.
17/17 20 Amp.
15/15 15 Amp.
12/12 10 Amp.
8/8 5 Amp
30
40
50
Volts

Fig. 4.

qui présente un bien moindre écart par rapport aux régimes à

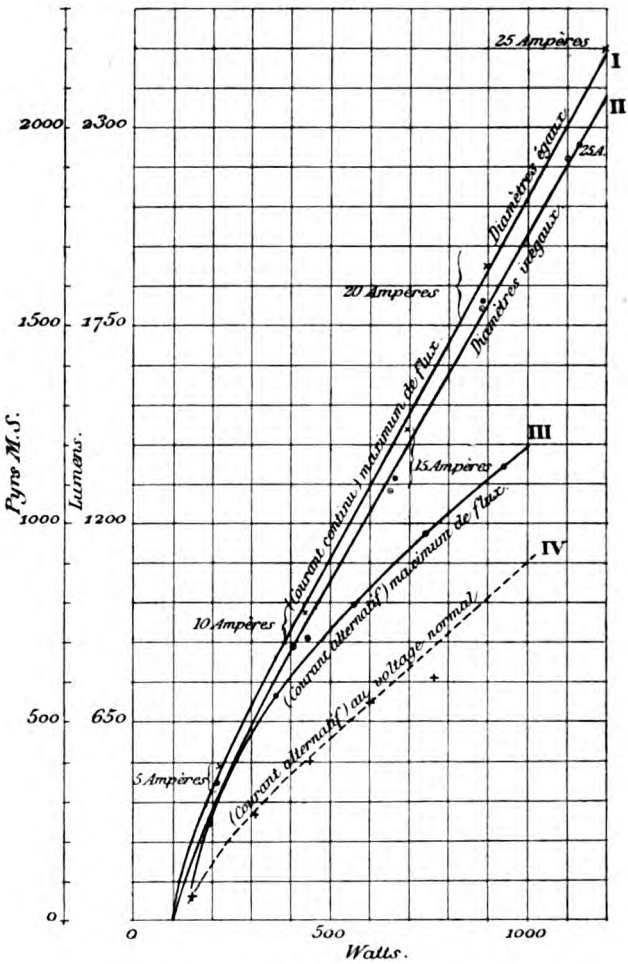


Fig. 5.

courant continu (le diamètre des crayons est encore supposé réduit : 18 mm pour les arcs alternatifs de 25 ampères) (¹).

(¹) Il est intéressant de comparer ces résultats à ceux qu'a obtenus d'autre part M. Wedding (¹) pour des arcs alternatifs de 4 à 40 ampères. Il a opéré

(¹) *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1897, p. 47.

Conclusion. — En définitive on voit qu'il n'est pas exagéré de prétendre que l'arc alternatif usuel peut être de 50 à 100 pour 100 inférieur comme rendement à l'arc continu, abstraction faite du rhéostat de stabilité. La substitution d'une bobine de self à ce rhéostat rétablit un peu l'équilibre en faveur de l'arc alternatif, mais on n'a pas cette économie à faire valoir avec les nouvelles lampes à courant continu à bas voltage, marchant sans rhéostat.

---

22 mesures sur les diamètres suivants et aux voltages suivants :

Intensité du courant.	Diamètre des crayons.	Tension aux bornes de la lampe.
4,02 à 9,34	8	25 à 29
9,4 à 9,8	10	27,2 à 27,6
12,38 à 12,51	12	28,04 à 28,35
15,85 à 23,5	15	27,7 à 29,7
28,7	18	30,2 à 30,7
39,0 à 39,8	20	30,8 à 31,4

Ces diamètres sont un peu plus petits et par suite plus favorables que les nôtres.

Il a déterminé l'intensité hémisphérique avec réflecteur émaillé de 12^{cm} de diamètre.

Pour les consommations de 75 à 250 watts (4 à 9,3 ampères) la dépense spécifique diminue rapidement; au-dessus de 250 watts elle diminue lentement suivant une loi presque linéaire; mais cette variation tient compte en partie de l'effet du courant constant du shunt, dont l'influence prédomine pour les petites puissances. En outre, l'accroissement de la densité de courant pour les gros arcs fait déborder les parties incandescentes des crayons en dehors des cratères et augmente ainsi le rayonnement utile sans accroître proportionnellement l'occultation.

D'après ces expériences on obtient, avec un réflecteur émaillé, une intensité hémisphérique

$$L_{hefners} = 1,4\, W_{watts} - 102.$$

Si l'on tient compte de l'accroissement d'environ 80 pour 100 produit par le réflecteur sur l'intensité hémisphérique (laquelle est sans cet organe sensiblement égale à l'intensité moyenne sphérique) et de la réduction des diamètres des charbons, on trouve entre nos chiffres et ceux que donne cette formule un accord assez satisfaisant dans une question qui se prête peu à la précision absolue.

M. Wedding a également comparé les rendements des arcs alternatifs à ceux des arcs continus et il trouve des résultats assez voisins des nôtres; mais on ne peut y attacher la même valeur parce que ses expériences sur l'arc continu avaient été exécutées avec des charbons différents et à plusieurs années de distance.

TABLEAU I. — Courant continu.

Charbons Siemens A.

RÉGIME DE 5 AMPÈRES.

Charbons 11/6.				*Charbons* 9/9.			
Volts.	Ampères.	Flux. en lumens.	Écart en mm.	Volts.	Ampères.	Flux. en lumens.	Écart en mm.
35	5	2350	0,5	34	5	3050	0
40	»	3640	0,9	37	»	3560	0,4
43	»	4075	1,5	40	»	3850	0,9
46	»	4350	1,8	43	»	4400	1,2
49	»	4550	1,9	47	»	5050	2
52	»	4675	3	50	»	5000	2,5

RÉGIME DE 10 AMPÈRES.

Charbons 16/10.				*Charbons* 12/12.			
Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.	Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.
31	10	4460	0	30	10	3225	0
34	»	6050	0	33	»	4900	0
37	»	7500	0,2	36	»	5925	0
40	»	8150	1,2	40	»	8470	0,6
43	»	8975	1,8	44	»	9750	1,5
46	»	9500	2,3	48	»	10460	2,9
49	»	9400	3,2	51	»	10460	4,2
52	»	9580	3,8	55	»	10370	5,8
55	»	9250	5,5				

RÉGIME DE 15 AMPÈRES.

Charbons 19/12.				*Charbons* 15/15.			
Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.	Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.
30	15	5275	0	33	15	6525	0
32	»	6220	0	39	»	11870	0,3
35	»	8600	0	42	»	13225	1
38	»	10875	0,25	45	»	14600	2
42	»	13050	1	48	»	15910	3,8
45	»	14380	2	54	»	15810	5,8
48	»	14750	3,2	57	»	15410	7
51	»	15250	4,8				
55	»	14400	6				

TABLEAU I (suite). — Courant continu.

Charbons Siemens A.

RÉGIME DE 20 AMPÈRES.

Charbons 21/13.				*Charbons* 17/17.			
Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.	Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.
32	20	7280	0	31	20	7060	0
35	»	13460	0	40	»	17250	0
39	»	16500	1,2	44	»	20475	1,2
43	»	19000	2,8	48	»	21910	3,3
46	»	20500	4,2	52	»	21410	5,7
49	»	19910	5				

RÉGIME DE 25 AMPÈRES.

Charbons 23/14.				*Charbons* 19/19.			
Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.	Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.
37	25	19900	0,5	31	25	10512	0
42	»	22800	2,3	35	»	13900	0
47	»	25550	4,3	40	»	20630	0
52	»	25700	6,8	44	»	24220	0,8
				48	»	27340	3,3
				52	»	28250	5,5
				56	»	26500	6,7

TABLEAU II. — Courant alternatif.

Charbons Siemens A.

RÉGIME DE 5 AMPÈRES.

8 *âme*, 8 *homogène*.

Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.
37	5	2350	0,2
40	»	2990	0,8
41	»	2990	1,4
43	»	2825	2
46	»	2600	2,7
48	»	2637	3,6

RÉGIME DE 10 AMPÈRES.

12 *âme*, 12 *homogène*.

Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.
34	10	4510	0
37	»	6790	1,3
39	»	7125	2,3
40	»	7437	3
42	»	7120	3
43,5	»	7000	3,9

RÉGIME DE 15 AMPÈRES.

15 *âme*, 15 *homogène*.

Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.
31,5	15	4900	0,7
34	»	6520	1
36	»	7920	1
37,5	»	8800	1,7
39	»	9980	2,6
44	»	8700	5,7
46	»	7860	7,2
48	»	7550	7,5

RÉGIME DE 20 AMPÈRES.

17 *âme*, 17 *homogène*.

Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.
34	20	8310	0,8
37	»	11300	1,7
41	»	12240	3
42	»	11630	2,8
44	»	11050	4,8
47	»	11300	5,2

RÉGIME DE 25 AMPÈRES.

19 *âme*, 19 *homogène*.

Volts.	Ampères.	Flux.	Écart.
31	25	6840	0
33	»	9750	0,8
35,5	»	11270	1,4
35,5	»	10700	»
36	»	10760	2
38,5	»	14250	3,2
39,5	»	14450	3,9
41	»	13670	»
41	»	13310	»
44,5	»	13050	»
45	»	13370	»

LAMPES A INCANDESCENCE SANS CULOT, SYSTÈME HOLLUB;

PAR M. LORSAY.

Nous nous faisons un devoir et un plaisir de faire connaître un progrès accompli dans la lampe à incandescence par la suppression du culot qui rend la lampe beaucoup plus économique comme prix et comme consommation de courant. Elle supprime de la matière première, de la main-d'œuvre, et l'atelier du plâtrage où la lampe séjourne le plus longtemps.

Les lampes au plâtre ont besoin d'environ 6 jours pour sécher; les électriciens savent que toutes les lampes fraîchement plâtrées sont sujettes à perte de charge et risquent de se dédouiller.

Par son dispositif fort ingénieux et le contact direct établi sur le courant, la lampe *Hollub* possède les avantages suivants :

Suppression de la perte de charge qu'occasionne la résistance du cuivre, ainsi que de l'action électrolytique qui rompt les fils conducteurs et rend la lampe à culot inutilisable lorsque la perte de charge est assez importante.

Les courts-circuits sont également supprimés, car aucun métal ni l'humidité dans le système *Hollub* ne peuvent relier les deux pôles, la tête de cette lampe étant un parfait isolant.

Les courts-circuits entraînent l'extinction de la lampe; avec la lampe sans culot, l'interruption de la lumière n'est plus à craindre

Sur une installation, aussi défectueuse qu'elle soit, il n'y aura pas de court-circuit dans la lampe.

Avec la lampe à culot au plâtre, il suffit d'un point de soudure sur une lampe ou sur un pôle placé dans le circuit et d'une deuxième lampe à culot qui ait également un point de soudure sur l'autre pôle pour avoir un court-circuit général; cela n'arrivera jamais avec la lampe *Hollub*, puisqu'il sera matériellement impossible que les points soient en contact.

Il est bon de rappeler ici que dans les lampes avec culot au plâtre livrées aux consommateurs, il y en a qui brûlent par court-circuit, se dédouillent ou s'éteignent par suite d'électrolyse.

De plus, il existe une perte de charge : l'expérience a été faite très souvent par les fabricants sur les lampes non dédouillées, c'est-à-dire avant le plâtrage, comparativement à la lampe à culot.

Avec la lampe *Hollub*, on pourra obtenir toutes les intensités à faibles ou hautes tensions. Elle se prêtera également à toutes les formes industrielles et artistiques et pourra recevoir les teintes les plus diverses afin d'être employée pour la publicité, les illuminations ou les décors de théâtre, et notamment sur tous les appareils exposés aux intempéries.

En raison de son bon marché et de ses avantages, la lampe *Hollub* pourra être employée à un régime très économique; c'est alors que son éclat lumineux sera des plus puissants, car nous ne perdons pas de vue que l'application de la lampe comporte trois facteurs :

La consommation, la durée, l'intensité.

La lampe *Hollub*, accessible à toutes les installations actuellement existantes, sans qu'on soit obligé de les modifier, est munie, suivant les différents cas, d'une gaine ou passe-partout qui se fixe aussi bien sur les douilles à baïonnettes, à ailettes ou *les douilles à vis*. Quant aux nouvelles installations, elles pourront être faites avec les douilles *Hollub* pour la lampe *Hollub*.

Cette lampe sans culot est donc la solution d'un problème posé depuis longtemps dans la fabrication des lampes et considéré jusqu'à ce jour comme insoluble.

SUR L'ESSAI SOMMAIRE DES CHARBONS DES LAMPES A ARC;

PAR M. ANDRÉ BLONDEL.

La bonne qualité des charbons est une qualité essentielle pour le bon fonctionnement des lampes industrielles, aussi bien que de celle des projecteurs électriques, par suite de la nécessité de réduire la section au minimum pour obtenir le minimum d'oscillation et le maximum d'éclat intrinsèque du cratère.

L'expérience a montré en effet que plus on concentre la surface

d'incandescence, plus on accroît l'éclat moyen et le rendement [1].

Lors de la mort de M. Carré, qui employait des procédés de fabrication spéciaux et coûteux, on a eu quelque peine à trouver dans l'industrie française des charbons de fabrication moderne pouvant donner d'aussi bons résultats. L'auteur a été amené à entreprendre, à cette occasion, des recherches comparatives sur les propriétés des différentes qualités du commerce et à rechercher, en se plaçant au point de vue de l'acheteur de charbons, un criterium d'appréciation, soit dans leur composition chimique, soit dans leur résistance électrique, soit dans leur structure moléculaire, soit dans leur rendement lumineux. Les résultats, comme on va le voir, ont été plus négatifs que positifs.

Structure moléculaire. — Pour étudier la structure moléculaire, on a fait faire par un habile opticien, M. Werlein, des coupes minces des charbons, par un procédé analogue à celui que l'on emploie pour les coupes de minéraux, c'est-à-dire en usant progressivement une tranche découpée dans le charbon. On a constaté ainsi des différences très grandes dans le grain de la matière, sans qu'il en résultât de différences bien sensibles entre les propriétés des charbons. En tout cas, on n'a pu trouver dans ce procédé un moyen de prévoir ni de vérifier les propriétés d'un charbon. On a seulement constaté un certain avantage à avoir un grain très fin.

Essais chimiques. — Ensuite une série d'essais d'ordre chimique a été entreprise avec le gracieux concours du Laboratoire de l'École nationale des Ponts et Chaussées [2]. Ils ont consisté dans des analyses quantitatives de la pâte des charbons et de leur mèche séparément. Ils ont fait ressortir que tous les charbons industriels actuels sont composés de carbone presque pur et ne contiennent qu'une quantité infime de matières étrangères. Le Tableau

---

(1) Cf. A. Blondel, *Sur le rendement de l'arc électrique* (*Éclairage électrique*, 1897).

(2) Les analyses chimiques ont été exécutées par M. Derome, chimiste de l'École des Ponts et Chaussées.

suivant indique par exemple les résultats obtenus sur trois échantillons de densités assez différentes.

MATIÈRE DES CHARBONS.

	Numéros des échantillons.		
	24.	25.	26.
1° *Densités.*			
Densité apparente	1,30	1,31	1,33
» absolue	1,63	1,67	1,85
2° *Composition.*			
Carbone	97,90	98,18	98,45
Hydrogène	1,10	0,88	1,22
Cendres (1)	0,25	0,20	0,25
Matières non dosées et perte (eau)	0,75	0,74	0,08

On voit que les cendres ne sont qu'à l'état de traces, grâce aux soins que l'on apporte maintenant dans le choix et la purification des matières employées; elles ne jouent, pour ainsi dire, plus aucun rôle dans la nature des charbons, et ne sauraient, par conséquent, servir à les différencier. Il serait beaucoup plus utile de pouvoir séparer les différentes espèces de *carbone* : coke, graphite, noir de fumée, qui figurent sous la rubrique carbone; malheureusement, cette analyse serait trop compliquée pour la pratique, et elle ne donnerait probablement non plus aucun résultat, car on a employé avec un égal succès des charbons de nature très différente.

Quant à la mèche, c'est généralement un mélange de carbone et de silicate dans une proportion qui varie de 5 à 15 pour 100. Par exemple, on a trouvé pour la composition des mèches des trois charbons précédents les chiffres suivants :

(1) Les cendres sont formées de silice, d'alumine et de peroxyde de fer; les quantités obtenues étaient trop faibles pour être analysées quantitativement.

PARTIES CENTRALES OU MÈCHES.

Composition.

	Numéros des échantillons.					
		24.		25.		26.
Carbone		81,80		82,20		84,90
Eau se dégageant vers + 300°		5,60		5,50		5,60
Silice	8,70		8,60		6,20	
Potasse	2,70		2,60		1,80	
Soude	0,25	12,00	0,26	11,90	0,20	8,70
Produits non dosés (alumine, oxyde de fer, chaux, chlore, acide sulfurique.)	0,35		0,44		0,50	
Matières non dosées et perte		0,60		0,40		0,80
Total		100,00		100,00		100,00

Ces compositions de mèches varient peu; du reste, la mèche influe autant par sa quantité, c'est à-dire par le diamètre du trou qu'elle remplit, que par sa composition. Le rôle de cette mèche est d'entretenir la conductibilité de l'arc pendant que le courant passe par zéro entre deux alternances, de façon qu'une faible tension suffise à le rétablir ensuite. Plus la mèche est abondante ou riche en matières salines, plus l'écart entre les charbons peut être grand ou la tension aux bornes faible, mais aussi moins est grand le pouvoir éclairant. Il y a donc là une question de mesure que l'expérience seule peut indiquer. Pour apprécier le résultat obtenu, on a trouvé que le meilleur criterium est fourni par la longueur de l'arc sous un voltage donné, comme on le dira plus loin.

Essais de résistance électrique. — Les méthodes précédentes n'ayant pas donné de résultat positif, on a eu recours enfin à la comparaison des résistances électriques, et l'on a déterminé les résistances spécifiques d'un grand nombre d'échantillons, de provenances différentes et de diamètres variés. Le Tableau ci-dessous résume les différents résultats.

DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DE CHARBONS.

MARQUES distinctives des crayons.	DIAMÈTRE des crayons en millimètres.	RÉSISTANCE électrique linéaire des crayons en ohms par mètre à la température ordinaire et pour une longueur de :		LONGUEUR des crayons soumis à la mesure en centimètres.	RÉSISTIVITÉ des crayons en microhms-cm.
		100 mm.	68 mm.		
Maison Carré. Charbons à mèche.					
N° 1274 A...	15,1	0,0494	"	45	8846,5
B...	18	0,0144	"	45	3664,4
C...	16,3	0,0351	"	45	7324,4
N° 1275....	23,1	0,0149	"	45	6244,5
N° 1276 A...	11,9	0,0326	"	25	3625,8
B...	10,1	0,0916	"	45	7338,9
Maison Berne. Charbons à mèche.					
N° 1277 A...	21,8	0,0245	"	25	9144,7
B...	21,8	0,0202	"	25	7539,7
Société « Le Carbone ». Charbons à mèche.					
N° 1278 A...	23,1	0,0133	"	45	5573,9
B...	23	0,0148	"	45	6149,0
N° 1279....	20	0,0233	"	27	7319,9
N° 1280 A...	10	0,0755	"	27	5929,75
B...	8	0,1220	"	27	6132,39
Société française de Nanterre. Charbons à mèche.					
N° 1281 A...	17,7	0,0362	"	40	8907,3
B...	21,3	0,0160	"	45	5701,2
C...	23	0,0135	"	40	5608,9
N° 1282....	10	0,0727	"	45	5709,8
N° 1283....	15,1	0,0321	"	45	5748,4
Maison Siemens frères, à Charlottenburg.					
N° 1295 A...	24,5	"	0,0137	"	9498,0
B...	25,5	"	0,0122	"	9162,6
C...	26,5	"	0,0110	"	8922,1

Ces essais ont montré que, dans une même fabrication, la résistance peut varier du simple au double, et qu'en tout cas elle ne donne pas un criterium de la qualité; par exemple, les charbons Carré ayant une résistivité de 3600 et ceux de Siemens ayant une résistivité de 9400 donnaient des résultats équivalents.

On a conclu seulement que la constance de la résistivité prouve en faveur de la régularité de la fabrication (c'est le cas, par exemple, des charbons de Nanterre) et qu'une trop grande conductibilité peut être nuisible. En effet, en essayant des charbons graphités de la Société *Le Carbone,* dont la résistance spécifique descend au-dessous de 0,001, on n'a obtenu que des arcs très instables qui se déplacent constamment autour des pointes. Une grande résistance spécifique fixe mieux l'arc sur l'âme. D'autre part, cependant, une bonne conductibilité est fort désirable pour empêcher le charbon de rougir sous l'action du courant, quand on emploie des densités de courant très élevées, qui sont nécessaires pour l'obtention d'un grand éclat intrinsèque. Il convient donc de choisir un juste milieu; les résistivités les plus favorables pratiquement sont celles de 0,004 à 0,006 ohm-centimètre [1].

Essais de fonctionnement. — Les études précédentes ont conduit à cette conclusion que les vrais essais pratiques pour le choix ou la réception des charbons sont les essais de fonctionnement et les essais photométriques. Les premiers consistent à faire brûler les charbons dans les conditions de l'emploi; ils ne doivent pas rougir ni se tailler trop en pointe; la hauteur des cônes tronqués ne doit pas dépasser deux à trois fois leur diamètre. La taille doit être bien régulière, c'est-à-dire les facettes qui limitent les cônes tronqués orientées perpendiculairement à l'axe. L'arc doit être stable, ne pas se déplacer trop autour des pointes et ne pas produire un son strident (cette dernière condition est cependant remplie difficilement pour les arcs de forte intensité). On a une bonne mesure de la régularité en relevant par un voltmètre enregistreur les variations de la tension aux bornes pendant la

---

[1] On pourrait augmenter la conductibilité artificiellement par l'emploi de charbons cuivrés; mais les essais qui ont été faits plusieurs fois ont montré qu'il peut se former quelquefois une goutte de cuivre fondu qui, en tombant, fraie un chemin à l'arc. Celui-ci quitte alors les pointes de charbon, puis s'éteint.

marche; elles doivent être peu nombreuses et peu importantes et ne pas dépasser 5 à 10 pour 100 suivant les applications.

Enfin, l'écart des crayons doit se maintenir à peu près constant sous un voltage donné et être convenablement proportionné. Cela dépend du diamètre de la mèche et de sa composition. L'expérience a démontré que, sous une force électromotrice de 45 volts, de bons charbons présentent des écarts de 3 à 5 mm. Au-dessus ou au-dessous de ces chiffres, le régime est moins stable; on va voir aussi que le rendement photométrique est moins bon [1].

Mesures photométriques. — Ces essais doivent consister à mesurer par le lumen-mètre le flux de lumière total fourni par l'arc; ils ne renseignent pas seulement d'une façon brutale sur la puissance que celui-ci donne au régime choisi, mais, si on les étend autour de ce régime, ils indiquent la variation du flux total du faisceau suivant les circonstances, et permettent de vérifier si le régime choisi est bien le plus avantageux pour les charbons considérés. Les essais de ce genre, dont nous avons rendu compte ailleurs (*loc. cit.*), ont bien mis en évidence à ce point de vue :

L'influence du diamètre des charbons sur le rendement;

L'influence de la tension entre les pointes des crayons;

L'influence de la nature des crayons;

L'influence de la forme de la force électromotrice de la machine pour les courants alternatifs.

On ne peut que souhaiter de voir se généraliser ces études, afin d'augmenter les documents déjà recueillis.

En tout cas, la mesure du flux lumineux donne le meilleur criterium de la valeur des crayons considérés comme agents de transformation de l'énergie électrique en énergie lumineuse.

---

[1] Pour tout ce qui touche aux meilleures conditions de taille et d'écart, l'auteur ne peut que renvoyer aux admirables travaux de Mme Ayrton sur ce sujet.

SOUS-SECTION C.

PRISE DE COURANT POUR TRACTION ÉLECTRIQUE;

PAR M. E. BÈDE.

L'organe essentiel de ce système de contact est un bouchon de caoutchouc traversé par un bouton de cuivre.

Ce bouchon sert tout à la fois pour ce bouton : 1° d'isolant ; 2° de support mobile, lui permettant de venir, sous la pression d'un collecteur de courant, toucher une pièce en contact avec le conducteur électrique ; 3° de ressort pour séparer ensuite le bouton de ce conducteur. On peut appliquer ce bouton de contact de bien des manières.

A Bruxelles, le câble conducteur, avec son enveloppe isolante sans couverture de plomb ni armature, est placé dans un canal formé de deux cornières et placé le long d'un des rails de la voie.

La face horizontale supérieure de ce canal est au même niveau que les rails. La face verticale du côté du rail est percée de mètre en mètre par des trous que ferment les bouchons de caoutchouc dont nous venons de parler. En face de ces trous le câble a été dénudé et l'on y a soudé des selles de cuivre qui font vis-à-vis à 3mm de distance aux pieds des boutons de cuivre traversant les bouchons.

Les selles en question, ainsi que les parties environnantes du câble, sont soigneusement isolées par des manchons de caoutchouc en forme de ⊥ serrés sur le câble et dont les branches transversales sont fermées par les bouchons de contact.

L'expérience a constaté que cet ensemble est suffisamment hermétique. Elle a établi, en outre, un fait très intéressant. Si, après de grandes pluies, un peu d'eau pénètre à travers les enveloppes de caoutchouc de manière à créer des courants dérivés vers

la terre et, par suite, à affaiblir la résistance d'isolement, celle-ci ne tarde pas à se relever dès que le courant passe dans le câble. C'est ainsi que nous avons constaté, à différentes reprises, que la résistance d'isolement était doublée après trois heures de marche et quadruplée après six heures.

Cela résulte sans doute de ce que la chaleur développée par le passage du courant dans les petites veines liquides suffit pour les vaporiser.

On n'a donc pas à redouter les effets de l'introduction de l'eau dans la canalisation. Cependant, il sera toujours utile, sinon nécessaire, d'établir le long de la ligne, en des points indiqués par le profil de celle-ci, des puisards en communication avec des égouts, afin de ne pas laisser noyés, pendant trop longtemps, le conducteur et les organes de contact. Il pourrait en résulter des conséquences fâcheuses. C'est ainsi que, pendant l'hiver dernier, nous avons eu plusieurs parties de notre ligne d'essai submergées pendant 48 heures, parce que le sol des rues, gelé jusqu'à 40 ou 50 cm de profondeur, n'a pas permis, au moment du dégel, l'écoulement en terre de l'eau provenant de la fusion de la neige et d'abondantes averses.

Mais, dans cette occasion comme dans d'autres, nous avons constaté que la voiture marchait fort bien, même avec la rainure pleine d'eau. La charrue frotteur projette cette eau au dehors et la consommation de courant mesurée à l'ampèremètre n'augmente pas sensiblement. Comme ce fait ne se produit que pendant ou immédiatement après de grandes averses, il peut s'expliquer par la mauvaise conductibilité de l'eau relativement pure qui remplit la rainure.

Je dois encore mentionner deux faits constatés par une expérience déjà assez longue. La ligne actuelle a été placée en mars 1899. Elle est établie dans la station des chemins de fer vicinaux, rue Eloy, et en sort pour traverser cette rue et aller à 350 m de distance dans la rue de l'Instruction. Dans la traversée de la rue Eloy, la voie et la canalisation sont soumises à un charroi très intense. De plus, la voie n'ayant été établie que pour des trains de marchandises laisse beaucoup à désirer; elle est d'ailleurs très tortueuse, puisque, sur un parcours total de 450 m, nous avons quatre courbes de 35, 40, 45 et 70 m de rayon.

Or, l'expérience a montré que notre canalisation se maintient fort bien. Nous avons pu, cette année, enlever les doublures de bois que j'avais cru devoir placer le long des rails pour couvrir les boulons d'éclisses des rails.

Enfin, la pratique a montré aussi que le nettoyage de la rainure est beaucoup moins embarrassant qu'on n'avait pu le supposer. Le nettoyage des 450 m ne prend guère qu'une demi-heure de manœuvre et le plus souvent on ne le pratique qu'une fois par semaine.

Il semble donc que ce nouveau système de prise de contact ne présente pas de difficulté pratique.

Il me paraît offrir un avantage spécial : en connectant avec soin les éléments de la canalisation entre eux et avec les dynamos génératrices, on peut avoir un bon retour de courant par l'enveloppe de fer de câble, de telle sorte que les conducteurs d'aller et de retour sont à peu près concentriques. Dès lors, il n'y a pas à craindre d'effets d'induction sur les appareils de précision. Cet avantage n'est pas à dédaigner, lorsque l'on considère que l'on a dû fermer des observatoires à cause des désordres produits dans leurs appareils, par le voisinage de lignes aériennes servant à la traction des tramways.

Enfin, le système que nous venons de décrire paraît offrir une sécurité complète. Ni les passants, ni les animaux ne peuvent, en aucun cas, se mettre accidentellement en contact avec un point quelconque à un potentiel élevé.

Sans doute, en se servant de certains outils, ou même en appuyant fortement avec les doigts sur un bouton, on peut se donner le plaisir d'une commotion. On n'a pas même à craindre le succès d'une telle tentative de suicide; car certains de nos visiteurs en ont héroïquement fait l'essai et, un jour, trois gamins réunissant leurs efforts pour presser un bouton, ont réussi sans doute dans leur tentative; car on les a vus faire un bond et s'enfuir à toutes jambes, ce qui prouve que le contact n'avait pas été bien dangereux.

On peut employer comme conducteurs des câbles de longueur quelconque. Il serait facile, en effet, de poser d'abord les cornières inférieures du conduit et d'y placer ensuite des tronçons de câbles de plusieurs centaines de mètres de longueur; mais j'ai préféré

diviser les conducteurs en tronçons de même longueur que les cornières et terminés par des connexions.

Ce mode d'exécution permet de construire et d'éprouver dans les ateliers de construction les tronçons séparés qu'il ne reste plus qu'à assembler.

La canalisation installée à Bruxelles est formée de tronçons de 9 m de longueur; chaque tronçon renferme un bout de câble de cette longueur portant neuf contacts et terminé par deux douilles en cuivre, entaillées de manière à pouvoir être réunies par une double griffe.

Ces deux douilles et cette griffe sont enfermées dans un manchon de caoutchouc identique à ceux des contacts; la griffe est dans la branche transversale du manchon; elle est pressée par un bouchon de caoutchouc légèrement conique qui ferme cette branche et se trouve pressé lui-même par un couvercle vissé sur une douille taraudée, fixée dans un morceau de cornière éclissé à celles de la canalisation. En enlevant ce couvercle on peut retirer la griffe et, par conséquent, déconnecter deux tronçons de câble. Il suffit de 2 ou 3 minutes pour connecter ou déconnecter.

Dans le cas où un accident arrive à la canalisation, par exemple s'il se produit un court circuit dans un de ses tronçons, on peut placer à l'extérieur un câble de secours rejoignant les deux tronçons séparés par celui qui est avarié et qui est mis hors du circuit. Les voitures franchissent celui-ci par leur vitesse acquise et, lorsque la journée de service est terminée, on enlève la partie malade et on la remplace par un tronçon de réserve. Il suffit de 4 ou 5 minutes pour placer un tel câble de secours.

Les bouchons de contact peuvent, en cas d'avarie, s'enlever et se remplacer dans le même temps.

On a objecté au système qui nous occupe l'altération que pourra subir le caoutchouc. Mes premiers essais datent de plus de cinq ans; j'ai encore des bouchons de cette époque; ils sont comme neufs.

Du reste, on sait que les ressorts, les clapets, etc., quand ils sont en bon caoutchouc, durent de longues années. Il n'y a pas de raison pour que nos bouchons et nos manchons durent moins longtemps.

Une dernière observation. Le système que nous venons de

décrire n'est pas à contact superficiel puisqu'il ne présente aucun point de contact à la surface des voies. Il diffère notablement sous ce rapport de tous les systèmes électromagnétiques à plots superficiels qui ont été essayés, et l'on ne peut pas lui appliquer les objections faites contre ceux-ci au point de vue de la sécurité.

TROISIÈME SECTION.

LES PRINCIPES DE L'ANALYSE ÉLECTROLYTIQUE;

PAR M. A. HOLLARD.

Étant donnée la place de plus en plus importante qu'occupe l'analyse électrolytique dans les laboratoires industriels, il m'a semblé utile de résumer les principes qui doivent guider, à mon sens, l'analyste dans des recherches d'ordre électrolytique. Tout d'abord, je me garderai de dire que les méthodes électrolytiques sont destinées à se *substituer* aux méthodes gravimétriques et volumétriques. Elles sont destinées à les *compléter* dans un grand nombre de cas.

Un des grands avantages de l'analyse électrolytique, c'est la simplicité de la manipulation qui consiste à placer des électrodes dans un liquide, à régler le courant et, à la fin de l'opération, à laver une des électrodes, la sécher et la peser.

Nous supposerons dans l'énoncé de ces principes l'hypothèse des *ions* admise.

I. — TENSION DE POLARISATION.

1. *Tout sel métallique, de même que tout acide et toute base, en solution aqueuse, se séparent électrolytiquement sous l'influence d'une tension électrique minima, dite* tension de polarisation.

Ce principe n'est pas rigoureusement vrai en analyse, parce que, comme l'a montré Nernst, cette tension de polarisation dépend de la concentration du métal et que cette concentration diminue à chaque instant au fur et à mesure que le métal se dépose.

La tension de polarisation e se compose, si l'on néglige la ten-

sion ri nécessaire à vaincre la résistance r du bain, de deux valeurs tout à fait indépendantes l'une de l'autre : 1° de la tension ε_a nécessaire pour séparer les anions à l'anode ; 2° de la tension ε_k nécessaire pour séparer les cathions à la cathode.

Chaque sorte d'anion ou de cathion a, pour une même concentration, une valeur déterminée ε_a ou ε_k.

Le Tableau ci-dessous donne quelques valeurs trouvées par Nernst pour les tensions relatives à quelques anions et cathions en concentration normale, c'est-à-dire à $\frac{M}{\nu}$ grammes par litre, M étant le poids moléculaire et ν la valence de l'ion.

A la cathode ε_k.		A l'anode ε_a.	
$\overset{+}{Ag}$	—0,78	$\overline{I}$	0,52
$\overset{++}{Cu}$	—0,34	$\overline{Br}$	0,94
$\overset{+}{H}$	0,0	$\overline{O}$	1,08
$\overset{++}{Pb}$	+0,17	$\overline{Cl}$	1,31
$\overset{++}{Cd}$	+0,38	$\overline{OH}$	1,68
		$\overline{\overline{SO^4}}$	1,9
$\overset{++}{Zn}$	: +0,74	$\overline{HSO^4}$	2,6

La tension de polarisation minima nécessaire pour effectuer une électrolyse quelconque s'obtiendra en faisant la somme

$$e = \varepsilon_k + \varepsilon_a.$$

C'est ainsi que le sulfate de cuivre, en concentration normale, exige pour sa séparation électrolytique la tension

$$e = 1,9 - 0,34 = 1,56 \text{ volt}.$$

Les valeurs ε_k et ε_a dépendent de la concentration des cathions et des anions. En analyse électrolytique, où il y a toujours un grand excès d'anions par rapport aux cations à précipiter, la concentration des anions ne varie pas suffisamment au cours de l'électrolyse pour faire varier sensiblement la valeur ε_a. Au contraire, la concentration des cathions qui se précipitent sur la cathode diminue constamment au cours de l'électrolyse jusqu'à ce qu'elle devienne pratiquement nulle ; il en résulte des variations sensibles

pour ε_k et par suite pour e. Ces variations sont données par la formule de Nernst :

$$\varepsilon_k = \frac{k}{\nu} \log \frac{P}{c} \text{ volts},$$

où k est une constante pour une même température, ν est la valence du métal précipité, c est la concentration des ions du métal et P est la *tension de dissolution* de ce métal. L'idée de tension de dissolution a été suggérée dans la théorie des ions par l'analogie qu'on a établie entre le phénomène de l'ionisation et celui de la vaporisation : de même qu'un liquide (ou d'ailleurs tout autre corps) possède une certaine tendance à passer à l'état de vapeur et que la mesure de cette tendance est exprimée par sa tension de vapeur, de même une substance susceptible d'envoyer des ions en solution tend à passer à l'état d'ions et la mesure de cette tendance est exprimée par sa tension de dissolution.

D'après la formule précédente, on voit que si la concentration c des ions du métal qui se dépose sur la cathode diminue en progression géométrique, la valeur de ε_k augmente en progression arithmétique.

A la température ordinaire (17°) on trouve que si la concentration est réduite au dixième de sa valeur, ε_k augmente de $\frac{0,0575}{\nu}$ volt, ν étant la valence du métal.

Considérons, en particulier, une solution de sulfate de cuivre en concentration normale, c'est-à-dire contenant $\frac{63}{2}$ grammes de cuivre par litre; cette solution peut être considérée comme pratiquement dissociée. Au fur et à mesure que la concentration des ions $\overset{++}{Cu}$ diminuera par suite du dépôt du cuivre sur la cathode, les valeurs de ε_k et de e seront les suivantes :

Concentration (nombre de grammes par litre).	ε_k.	e.
31,5000	—0,34	1,56
3,1500	—0,31	1,59
0,3150	—0,28	1,62
0,0315	—0,25	1,65
0,0031	—0,22	1,68
0,0003	—0,19	1,71

Les concentrations plus petites sont pratiquement nulles en analyse.

Les augmentations de la tension de polarisation auraient été encore plus rapides si l'on avait considéré des sels à métaux monovalents.

Les considérations qui précèdent peuvent donc être formulées ainsi :

La tension minimum à mettre aux bornes d'une cuve électrolytique croît avec la dilution du sel.

Si maintenant on classe les métaux par ordre décroissant de tension de polarisation, pour une concentration déterminée, on voit (Tableau ci-dessous) que la différence des tensions de polarisation de deux métaux consécutifs est bien souvent inférieure aux variations de cette tension au cours de l'électrolyse.

	Solution à 1 molécule-gramme par litre.	
Métaux.	Sulfates.	Chlorures.
Manganèse	2,715	2,134
Zinc	2,424	1,813
Cadmium	2,062	1,484
Fer	1,993	1,397
Cobalt	1,881	1,295
Nickel	1,798	1,290
Etain	»	1,225
Plomb	»	1,215
Hydrogène	1,662	1,061
Bismuth	1,410	0,995
Antimoine	»	0,934
Arsenic	»	0,760
Cuivre	1,385	»
Mercure	0,920	»
Argent	0,926	»
Palladium	»	0,244
Platine	»	0,170
Or	»	0,060

En résumé, une méthode d'analyse basée *exclusivement* sur la séparation successive des métaux par accroissement graduel de la tension électrique aux bornes ne serait pas exacte. Ce principe permettra cependant de séparer les métaux ayant des tensions *très*

différentes. On pourra par exemple séparer le cuivre ou l'argent d'avec le nickel et le fer, comme on le fait d'ailleurs dans l'analyse du cuivre industriel.

Il faut donc chercher d'autres principes pouvant servir de base à la séparation électrolytique des métaux. Nous allons ainsi être amené à parler des *sels complexes*.

Auparavant, notons les deux principes qui découlent des considérations qui précèdent.

2. *Étant données en solution différentes sortes d'anions et de cathions, il y aura électrolyse lorsque la tension de polarisation sera suffisante pour libérer à la fois l'un des cathions et l'un des anions.*

3. *La tension minima à mettre aux bornes d'une cuve électrolytique croît avec la dilution du sel.*

II. — Les sels complexes.

Les solutions employées en électrolyse, que ce soient des solutions acides, basiques ou neutres, peuvent contenir le métal à l'état de *sel simple* (sulfate de cuivre, nitrate d'argent, etc.), de *sel double* (sulfate de nickel et d'ammonium, etc.) ou de *sel complexe* (zincate de sodium, arséniate de potassium, etc.).

Un *sel simple* envoie son métal vers la cathode à l'état d'ions.

Un *sel double* se comporte à l'électrolyse comme un mélange de deux sels simples, c'est-à-dire que les deux métaux se dirigent vers la cathode à l'état d'ions.

Un *sel complexe* est un sel qui, en solution, se dissocie pour donner, non pas des ions-métal, comme dans les sels simples ou doubles, mais des ions complexes où entre le métal.

Les sels complexes que l'on rencontre le plus souvent en analyse sont les arséniates, les antimoniates, les sulfhydrates doubles de sodium, les oxalates doubles alcalins, les cyanures doubles de potassium. (La dénomination de *double* appliquée aux sulfhydrates, aux oxalates et aux cyanures est donc impropre; nous la remplacerons par celle de *complexe*.)

Dans les solutions des sels complexes, un des métaux est le

cathion, le reste de la molécule est l'anion complexe contenant l'autre métal.

Voici quelques exemples de sels complexes dissociés en ion complexe contenant l'un des métaux et en cathion constitué par l'ion de l'autre métal :

$$Cu^3(AsO^4)^2 = \underbrace{3\overset{++}{Cu} + 2\overline{\overline{\overline{\overline{AsO^4}}}}}$$

Arséniate de cuivre.

$$K^2[Zn(OH)^4] = \underbrace{2\overset{+}{K} + \overline{\overline{Zn(OH)^4}}}$$

Zincate de potassium.

$$K^2[(C^2O^4)^2Zn] = \underbrace{2\overset{+}{K} + \overline{\overline{(C^2O^4)^2Zn}}}$$

Oxalate complexe de zinc et de potassium.

$$K[(CAz^2)^2Ag] = \underbrace{\overset{+}{K} + \overline{(CAz^2)^2Ag}}$$

Cyanure complexe d'argent et de potassium.

Le métal de l'anion complexe ne pourra se déposer électrolytiquement que si cet anion se dissocie à son tour, ou si l'on décompose cet anion par un courant à forte tension.

Dans un certain nombre de sels complexes, l'ion complexe est déjà en partie dissocié, comme l'a montré Freudenberg; le métal engagé dans cet ion se dépose alors directement à la cathode comme pour un sel simple, avec cette grande différence cependant que, la concentration des ions de ce métal étant toujours très faible, la tension aux électrodes doit être plus grande que pour un sel simple. C'est le cas du cyanure de cuivre par exemple [1].

Il est facile de voir tout de suite l'application qu'on peut faire de ces ions complexes en analyse : on commencera par séparer les différents métaux contenus dans un mélange, par groupes, en utilisant la différence des tensions de polarisation relatives à ces groupes, à condition que cette différence soit très grande. Puis, dans chacun de ces groupes, on tâchera de séparer les métaux en engageant un ou plusieurs d'entre eux dans des ions complexes; et alors : ou bien le dépôt électrolytique de ces métaux ne pourra se faire, ou, si l'ion complexe est partiellement dissocié, le dépôt

---

[1] FREUDENBERG, *Zeit. f. phys. Chem.*, t. XIII, p. 97.

se fera, mais avec une tension de polarisation qui pourra être assez grande par rapport à celle des autres métaux pour que la séparation en soit rendue possible.

III. — Intensité du courant.

L'intensité du courant règle, conformément à la loi de Faraday, la quantité de métal déposé dans un temps donné. Il semble donc qu'on puisse calculer aisément, d'après cette loi, le temps nécessaire pour priver complètement d'un métal déterminé un bain. Il n'en est rien, car le bain contient toujours des cathions étrangers à ce métal, en particulier des ions $\overset{+}{H}$. La concentration de ces ions est assez faible pour que, au début de l'électrolyse, elle soit négligeable par rapport à la concentration du métal à déposer; la quantité de métal déposé est alors proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe conformément à la loi de Faraday. Mais, lorsque le bain s'est appauvri en métal, la concentration des ions de celui-ci est comparable à celle des ions $\overset{+}{H}$ (pour ne parler que des ions $\overset{+}{H}$). La loi de Faraday s'applique toujours, mais à condition de tenir compte du dépôt à la cathode, non seulement des ions-métal, mais encore des ions $\overset{+}{H}$.

Cette concentration des ions $\overset{+}{H}$, d'ailleurs, augmente souvent au fur et à mesure que l'électrolyse se prolonge, ce qui retarde encore la fin de l'opération; c'est ce qui a lieu, par exemple, dans l'électrolyse du sulfate de cuivre, où la quantité d'acide sulfurique du bain augmente proportionnellement à la quantité de cuivre déposé, puisque pour chaque équivalent de cuivre déposé il y a un équivalent d'acide sulfurique formé.

$$\underbrace{\overline{\overline{SO^4}} + \overset{++}{Cu}}_{\text{Sulfate de cuivre.}} + H^2O = \underbrace{\overline{\overline{SO^4}} + \overset{+}{H^2}}_{\text{Acide sulfurique.}} + O + Cu.$$

L'acide sulfurique étant dissocié en ions $\overset{+}{H}$ et $\overline{\overline{SO^4}}$, sa production amène dans le bain de nouveaux ions $\overset{+}{H}$.

Ainsi, dans une analyse électrolytique, la plus grande partie des éléments à séparer se dépose pendant les premiers moments et les dernières parties se déposent beaucoup plus lentement.

La *densité du courant*, c'est-à-dire le rapport de l'intensité à la surface totale de l'électrode sur laquelle se fait le dépôt, doit être comprise entre certaines limites. En effet, le degré de poli et le degré de compacité du dépôt, facteurs très importants en analyse électrolytique, dépendent en partie de la densité du courant. En outre, une trop grande densité peut provoquer sur l'électrode un dégagement gazeux qui altère ou qui retarde la formation du dépôt.

IV. — Les électrodes.

Les électrodes doivent être inattaquables par les bains employés, cela va de soi; de plus, elles doivent offrir une forme telle que la densité du courant sur l'électrode qui reçoit le dépôt soit aussi homogène que possible.

Les électrodes idéales seraient constituées par deux sphères concentriques; le liquide se trouvant entre ces deux sphères.

Classen et Riban, pour se rapprocher le plus possible de cette forme idéale, se servent d'une capsule hémisphérique destinée à recevoir le dépôt électrolytique. L'autre électrode est située, concentriquement à la première, à l'intérieur de celle-ci; elle est constituée soit par un petit disque (Classen), soit par une petite capsule hémisphérique (Riban).

Dans les deux appareils qui précèdent, l'électrode destinée à recevoir le dépôt servant de récipient au bain, celui-ci devra être préalablement filtré et non susceptible de donner de précipité au cours de l'électrolyse. De plus, la face interne seule de la capsule est utilisée pour le dépôt, ce qui entraîne une grande dépense de platine.

L'appareil classique de Riche consiste en deux creusets concentriques : le creuset intérieur, qui est sans fond et percé de fenêtres, reçoit le dépôt électrolytique. Avec cet appareil, on peut laisser impunément des précipités au fond du bain; mais la dépense de platine est encore assez forte. L'appareil que nous avons fait construire, qui est une modification de celui de Luckow, offre, pour un poids minime de platine, une surface utile considérable. Il est constitué (voyez *fig.* 1) par un cylindre un peu évasé (en feuille ou en toile de platine) destiné à recevoir le dépôt et par une deuxième

électrode entourant la première à l'intérieur et à l'extérieur. La densité du courant est ainsi rendue à peu près homogène à l'intérieur et à l'extérieur de l'électrode destinée à recevoir le dépôt; cette densité, bien que moins rigoureusement homogène que dans les appareils de Classen et de Riban, est cependant suffisante dans la pratique. L'électrolyse se faisant dans un verre transparent, il est plus facile qu'avec les appareils précédents de suivre les différentes phases de l'électrolyse. Enfin, la présence d'un précipité au fond du vase ne gêne pas l'électrolyse.

ANALYSE DU CUIVRE INDUSTRIEL PAR VOIE ÉLECTROLYTIQUE [1];

PAR M. A. HOLLARD.

Le *cuivre* est séparé et dosé par voie électrolytique.

Les impuretés du cuivre sont séparées de la façon suivante : le *nickel*, le *cobalt*, l'*argent*, le *plomb*, par voie électrolytique, l'*arsenic* par distillation, l'*antimoine* par distillation et électrolyse, le *soufre* et l'*or* par précipitation.

Le *fer* est dosé par volumétrie.

Appareils d'électrolyse.

Ce sont les électrodes représentées par la figure 1. Les dimensions adoptées pour la présente méthode sont les suivantes : Électrode A, diamètres des bases 4,3 cm et 3,2 cm; génératrice 6,5 cm. Électrode B : diamètres des bases 4,5 cm et 5,5 cm [2]. — Suivant la nature des éléments à déposer électrolytiquement sur l'électrode A, on se servira d'électrodes à surface polie ou rugueuse. Le cuivre et le plomb (à l'état d'oxyde) se déposeront de préférence sur une surface rugueuse; l'antimoine, le nickel, le cobalt sur une surface polie; l'argent indifféremment sur une surface

---

(1) La méthode décrite ici est celle que nous suivons actuellement au Laboratoire central de la Compagnie française des métaux.

(2) Pour de très petites quantités de matière, on peut employer des électrodes plus petites, à condition de réduire l'intensité du courant indiqué.

polie ou rugueuse. La distance qui sépare le bord inférieur de l'électrode A du pied de l'électrode B, au cours de l'électrolyse, doit être de 0,8 cm environ.

Pratique de l'électrolyse.

Dosage du cuivre (électrolyse en solution acide). — On pèse 10 gr de matière en copeaux, débarrassés par l'éther et par l'aimant des matières grasses et des parcelles de fer provenant de l'outil. Ces copeaux sont introduits dans un verre de Bohême de 500 cm³ environ [diamètre inférieur 6,5 cm; hauteur 18 cm (¹)]. On verse dans celui-ci 20 cm³ d'acide sulfurique, puis 30 cm³ d'acide nitrique (²), après avoir tout d'abord immergé les copeaux de cuivre dans une quantité d'eau suffisante pour que l'attaque soit modérée. Le vase est alors recouvert d'un entonnoir dont les bords reposent à l'intérieur de ceux du verre et forment ainsi une petite gouttière dans laquelle quelques gouttes d'eau forment un joint hydraulique parfait. On chauffe doucement pour achever la fin de l'attaque.

La dissolution est complète pour un cuivre affiné. Les cuivres non affinés laissent un résidu insoluble; dans ce cas, on chauffe après l'attaque pour rassembler le précipité et aussi le débarrasser des sels de cuivre qu'il pourrait conserver.

La solution de cuivre étant étendue à 300 cm³, on y plonge complètement les électrodes A et B qui communiquent, la première avec le pôle —, la seconde avec le pôle + d'une batterie. La base

---

(¹) Cette grande hauteur est destinée à éviter les projections du bain en dehors du vase, pendant l'électrolyse.

(²) Si l'on veut opérer sur un poids de métal différent de 10 g, on prendra les quantités d'acide suivantes :

Pour	1 g de cuivre	20 cm³	d'acide nitrique	et	6 cm³	d'acide sulfurique.
»	2	»	21	»	8	»
»	5	»	25	»	15	»
»	20	»	40	»	35	»

Avec 20 g, on met le liquide encore chaud à l'électrolyse, autrement il cristalliserait.

Pour 5 g et au-dessous, on peut se servir d'électrodes plus petites. Celles dont nous nous servons ont les dimensions suivantes : Electrode A : diamètre 3 cm et 2,2 cm; génératrice, 5 cm. Électrode B : diamètres 3 cm et 3,7 cm. Les proportions d'acides sont, pour 5 g de cuivre, de 10 cm³ d'acide sulfurique et 15 cm³ d'acide nitrique pour un volume de 150 cm³.

de l'électrode B doit être aussi près que possible du fond du verre. On ferme le vase par deux demi-verres de montre qui ne laissent passer que les tiges des électrodes et l'on fait passer à travers le bain un courant de 1 ampère.

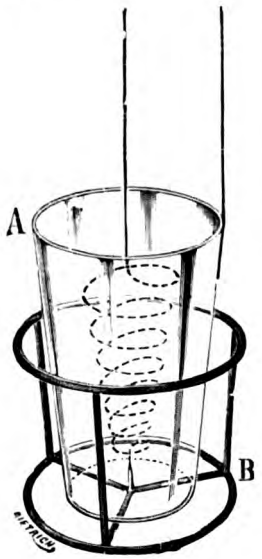


Fig. 1.

Lorsque la coloration bleue du liquide commence à disparaître, alors qu'il reste moins de 50 mg de cuivre dans le bain, on réduit le courant à 0,5 ampère et l'on ajoute au bain de l'eau oxygénée pure (environ 20 cm³ d'eau oxygénée à 12 volumes); on renouvelle cette addition de temps en temps. Ce réactif fait passer les ions $\overset{+++}{As}$ et $\overset{+++}{Sb}$ à l'état d'ions $\overline{\overline{\overline{AsO^4}}}$ et $\overline{\overline{\overline{SbO^4}}}$ qui ne peuvent se déposer sur la cathode.

Lorsque la solution ne contient plus de cuivre, on retire le vase et l'on plonge rapidement les électrodes successivement dans deux vases d'eau distillée; on les détache ensuite de leurs supports et l'on plonge la cathode dans de l'alcool concentré, puis, mouillée d'alcool, dans une étuve où elle est chauffée à 90° pendant 10 minutes environ; enfin on la pèse. Le poids trouvé, diminué de celui de l'électrode, représente le poids du cuivre plus celui de l'argent qui s'est déposé en même temps que le cuivre. On déduira donc

du poids du cuivre le poids de l'argent déterminé ultérieurement. Si le cuivre à analyser contient du plomb, une partie seulement de celui-ci s'est déposée sur l'électrode B à l'état d'oxyde, le reste du plomb étant resté dans la liqueur.

La précipitation du cuivre dans les conditions indiquées exige environ 24 heures.

Avec les cuivres riches en arsenic et en antimoine, il est très difficile, même en employant de l'eau oxygénée, d'empêcher une partie de ces corps de se déposer avec les derniers milligrammes de cuivre. On est alors obligé de retirer les électrodes lorsque la coloration bleue du liquide commence à disparaître, alors qu'il reste dans le bain environ 50 mg de cuivre. La cathode, qui n'a pas reçu la totalité du cuivre, mais qui a reçu la totalité de l'argent, est lavée, séchée et pesée comme il a été dit précédemment. Le reste du cuivre est déposé sur une autre électrode avec un courant de 0,5 ampère. Ce cuivre est accompagné d'une partie de l'arsenic et de l'antimoine qui lui donnent une teinte brune ou noire. On ajoute au bain de l'eau oxygénée pour réduire la proportion de ces impuretés sur le cuivre. Lorsque le cuivre est totalement déposé, on le dissout dans de l'eau contenant 40 cm³ d'acide nitrique à 36° B.; la solution neutralisée par de l'ammoniaque, exempte de matières organiques (¹) et ajoutée en excès, est électrolysée (I = 0,5 ampère); le cuivre se dépose ainsi complètement sans entraîner d'impuretés. Il est lavé, séché et pesé. On peut le déposer sur l'électrode recouverte de cuivre qu'on a retirée avant la fin de l'électrolyse, ce qui réduit le nombre des pesées.

Dosage du nickel et du cobalt (par électrolyse en solution de chlorure double ammoniacal) (²). — Le bain qui a servi à l'électrolyse du cuivre, et qui contient tout le nickel, tout le cobalt et tout le fer, est évaporé à sec jusqu'à ce qu'il ne reste plus que quelques gouttes d'acide sulfurique. Après refroidissement, on reprend par de l'acide chlorhydrique (10 cm³) et de l'eau; on chauffe pour achever la dissolution. La solution, portée à 70° en-

(¹) La présence de matières organiques donnerait lieu à un dépôt de charbon sur le cuivre.

(²) D'après la méthode d'Œttel.

viron, est débarrassée de l'arsenic, de l'antimoine et de l'étain par l'hydrogène sulfuré. Le liquide filtré est chauffé jusqu'à élimination du gaz sulfhydrique. On peroxyde ensuite le fer par addition d'eau oxygénée et ébullition du liquide. Celui-ci est ensuite neutralisé par de l'ammoniaque pure, ajoutée en léger excès; on fait bouillir, le fer précipite. On laisse refroidir et l'on ajoute 45 cm^3 d'ammoniaque libre à 10 pour 100. On étend, 300 cm^3; on laisse le peroxyde de fer se rassembler au fond du verre. On plonge complètement dans la partie claire les électrodes et l'on fait passer un courant de 0,5 ampère. Au bout d'une nuit, le nickel et le cobalt sont complètement précipités. On lave et l'on sèche l'électrode A comme il a été dit pour le cuivre; enfin on pèse. Si l'on désire avoir isolément les teneurs en nickel et en cobalt, on les sépare et dose par les méthodes connues.

Quantité maxima de métal à précipiter pour avoir un dépôt très adhérent : 0,2 g.

Dosage du fer (par volumétrie). — Le peroxyde de fer est jeté sur un filtre, puis dissous dans le moins possible d'acide chlorhydrique et dosé par l'iode (méthode de Mohr). Nous n'opérons cependant pas à chaud comme Mohr, mais à froid et en remplaçant l'amidon par du sulfure de carbone comme indicateur [1]. Voici la méthode telle que nous l'appliquons : La dissolution acide de chlorure ferrique, introduite dans un flacon bouché à l'émeri, est additionnée de bicarbonate de soude qui neutralise la plus grande partie de l'acide et remplit le récipient de gaz carbonique. La solution acide, qui doit être jaune sans nuance de rouge, est étendue à 100 cm^3 puis additionnée de 2 cm^3 de sulfure de carbone, puis de 5 cm^3 d'une solution à 60 pour 100 d'iodure de potassium. On bouche aussitôt après le flacon et l'on agite. Il se sépare une quantité d'iode proportionnelle à la quantité de fer

$$Fe^2Cl^6 + 2KI = 2FeCl^2 + 2KCl + 2I.$$

Cet iode est dosé au moyen d'hyposulfite de soude (à 12 g par litre) qu'on verse jusqu'à ce que la solution, ainsi que le sulfure

---

[1] Cet indicateur avait déjà été préconisé par Giraud dans son procédé de dosage de l'antimoine.

de carbone, soient complètement décolorés; on aura soin d'agiter après chaque addition d'hyposulfite.

Dans les conditions précitées, la quantité d'iode séparée est *rigoureusement* proportionnelle à la teneur en fer.

Dosage du plomb (par électrolyse en solution acide). — Une nouvelle prise de 10 g de cuivre est attaquée par de l'acide nitrique étendu contenant 50 cm³ d'acide nitrique à 36° B. Le liquide, étendu à 350 cm³, est soumis à l'électrolyse, l'électrode A étant reliée au pôle + et l'électrode B au pôle —. L'intensité du courant doit être de 0,3 ampère. Au bout de 18 heures environ, le plomb s'est intégralement précipité sur l'électrode A à l'état d'oxyde en un dépôt très adhérent, brun ou noir suivant l'épaisseur, tandis que le cuivre s'est déposé en partie sur l'électrode B. L'électrode A est alors plongée successivement dans deux vases remplis d'eau distillée, puis introduite dans une étuve que l'on chauffe progressivement jusqu'à 200°. Dans ces conditions, l'oxyde de plomb correspond exactement à la formule PbO^2; il suffit de multiplier son poids par le facteur 0,866 pour avoir le poids correspondant au plomb métallique.

Dosage de l'argent (par électrolyse en solution de cyanure et volumétrie). — On dissout une nouvelle prise de 10 g à 50 g de cuivre, suivant sa teneur présumée en argent dans de l'acide nitrique de densité 1,2. On fait bouillir pour chasser les vapeurs nitreuses; on filtre s'il y a lieu et l'on précipite le liquide, porté à 70° environ, par quelques gouttes d'acide chlorhydrique; on maintient cette température jusqu'à ce que le chlorure d'argent soit bien rassemblé. On filtre, on lave avec de l'eau chaude et l'on redissout le précipité dans du cyanure de potassium; on étend à 250 cm³; la solution doit être à 2 pour 100 de cyanure de potassium. Le courant doit être de 0,05 ampère. Au bout d'une nuit, le précipité est complet.

Ce précipité pourrait être pesé, mais il est plus court de le dissoudre dans de l'acide nitrique étendu de son volume d'eau et de le titrer au sulfocyanure (méthode de Volhardt). Mais pour que la précision à laquelle conduit cette méthode dépasse celle que fournit la pesée, il faut déterminer la fin de la réaction, non pas, comme

le dit Volhardt, par l'apparition de la coloration rouge due au sulfocyanure ferrique, mais par le retour, au moyen de nitrate d'argent titré, de cette coloration rouge à la coloration blanche du sulfocyanure d'argent. La netteté de ce dernier passage est, en effet, incomparablement plus grande.

On dissout donc l'argent dans 100 cm³ environ d'un mélange à volumes égaux d'eau et d'acide nitrique; on chauffe à l'ébullition après l'attaque pour éliminer toute vapeur nitreuse. La dissolution refroidie est additionnée de 5 cm³ d'alun de fer ammoniacal à 20 pour 100, puis d'une solution titrée de sulfocyanure d'ammonium jusqu'à coloration rouge. On ajoute ensuite une solution titrée de nitrate d'argent (à 2 g d'argent par litre) jusqu'à ce que la coloration rouge passe au rose, puis *brusquement* au blanc. Les solutions titrées de sulfocyanure d'ammonium et de nitrate d'argent se correspondent exactement, de sorte qu'il suffit de retrancher du nombre de centimètres cubes de sulfocyanure versés le nombre de centimètres cubes de nitrate d'argent versés et de multiplier par 2 cette différence pour avoir le poids de l'argent en milligrammes.

Dosage de l'arsenic (*par distillation et volumétrie*) (¹). — On introduit dans un ballon A (voir *fig* 2), d'une contenance de 300 cm³ environ, 5 g de métal réduit en copeaux avec 50 g de sulfate ferrique (²). Puis on verse par l'intermédiaire de la boule C et du robinet T, 250 cm³ d'acide chlorhydrique pur ordinaire. On ferme, aussitôt après, le robinet T, et après s'être assuré que la température du bain d'huile B est de 150° à 175°, on chauffe le ballon A d'abord doucement. Le métal se dissout et l'arsenic distille à l'état de chlorure arsénieux ; ce chlorure est retenu dans l'éprouvette E dans laquelle on a introduit d'avance 50 cm³ d'eau. On arrête l'opération quand il a passé 35 cm³ de liquide dans l'éprouvette E, ce qui a lieu une demi-heure environ après qu'on a commencé à chauffer le ballon A. Dans ces conditions, l'arsenic passe seul dans l'éprouvette E et l'antimoine reste dans le ballon A. Le tube en U, qui

(¹) A. Hollard et L. Bertiaux, *Bull. Soc. chim.*, 29 avril 1900.

(²) Ce sulfate doit être bien débarrassé de toutes traces de vapeurs nitreuses par des évaporations de la matière pulvérisée en présence d'un excès d'acide sulfurique.

contient quelques perles de verre, retient toutes les projections qui pourraient provenir de A. La solution arsénieuse obtenue par distillation est titrée par l'iode. Nous rappelons les détails de cette opération : on ajoute à la solution refroidie de l'ammoniaque

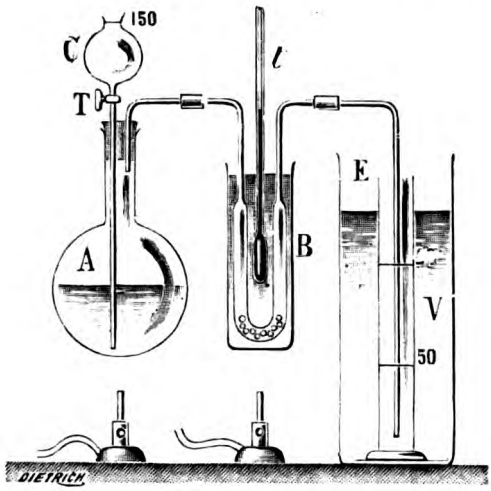


Fig. 2.

jusqu'à réaction alcaline. On rend de nouveau légèrement acide au moyen de quelques gouttes d'acide chlorhydrique, puis on ajoute un petit excès de bicarbonate de soude. La solution est enfin refroidie, additionnée de 5 cm³ d'eau d'amidon à 1 pour 100 et titrée à l'iode jusqu'à coloration bleue persistante.

Préparation des liqueurs titrées. — *Acide arsénieux.* — Peser 3,300 g d'acide arsénieux pur (ce qui correspond à 2,5 g d'arsenic) en poudre fine et 9 g de bicarbonate de soude. Traiter le mélange par 500 cm³ d'eau bouillante et prolonger l'ébullition jusqu'à ce que tout l'acide arsénieux soit dissous. Refroidir, ajouter 2 g de bicarbonate de soude et compléter à 1 litre :

$$1 \text{ cm}^3 = 0{,}0025 \text{ g d'arsenic.}$$

Solution d'iode. — Dissoudre 3,3 g d'iode pur dans 50 cm³ d'une solution à 20 pour 100 d'iodure de potassium; diluer à 1 litre, et titrer au moyen de 20 cm³ de la solution d'acide arsénieux :

1 cm³ de la solution d'iode doit correspondre à 0,001 g d'arsenic. On aura soin de faire tous les dosages sur le même volume de liquide et de tenir compte du nombre de dixièmes de centimètre cube nécessaires pour obtenir la coloration bleue permanente sur une solution exempte d'arsenic.

On reprendra de temps en temps le titre de la solution d'iode.

Solution d'amidon. — On fait bouillir 10 g d'amidon de pomme de terre dans 1 litre d'eau. On y ajoute 1 g environ d'alun de potasse qui joue le rôle d'antiseptique et, après refroidissement, on décante la liqueur claire. Cette solution se conserve plusieurs mois.

Dosage de l'antimoine (par distillation et électrolyse). — Le liquide qui est resté dans le ballon A et qui tient en dissolution le cuivre ainsi que ses impuretés moins l'arsenic est versé dans un ballon de 650 cm³ dont le fond a été préalablement recouvert extérieurement d'un enduit qui puisse lui permettre de supporter une haute température (¹). On introduit dans ce ballon 150 cm³ de chlorure de zinc (²) ayant pour densité 2,00, puis on distille l'antimoine à l'état de chlorure en faisant passer pendant tout le temps de l'opération un courant d'acide chlorhydrique gazeux (³). Le chlorure d'antimoine est reçu dans une fiole contenant de l'eau et refroidie extérieurement par de l'eau froide. Vers la fin de la distillation, on voit passer par le tube de dégagement des fumées blanches; on arrête la distillation quand ces fumées blanches ont fini de passer.

Le tube de sortie du ballon, au lieu d'être coudé à angle droit

---

(¹) Cet enduit s'obtient en plongeant le ballon dans une bouillie très claire de terre à four délayée dans de l'eau tenant en dissolution un peu de borate de soude et en suspension un peu de magnésie. Lorsqu'on a plongé le ballon dans ce liquide, on l'en retire, on le sèche et l'on recommence cette manipulation deux à trois fois.

(²) C'est Ulke (*Engineer and Mining Journal*, 1898, p. 727) qui a préconisé le premier le chlorure de zinc pour la séparation de l'antimoine dans le cuivre par distillation; mais, d'après la méthode qu'il indique, il ne faut pas moins de trois distillations successives pour avoir la totalité de l'antimoine.

(³) L'acide chlorhydrique gazeux est obtenu par addition continue et régulière d'acide sulfurique à la solution chlorhydrique du commerce, ces deux liquides étant exempts d'arsenic.

comme pour le ballon A, est coudé à angle aigu de façon à faciliter le départ des vapeurs lourdes constituées par le chlorure d'antimoine. De plus, l'extrémité de ce tube qui plonge dans le col du ballon ne doit pas dépasser la base inférieure du bouchon. Tout le fond du ballon est chauffé uniformément au moyen d'un fourneau à couronne (Wiesnegg); on évite ainsi les soubresauts. Une feuille d'amiante enfilée par le col et reposant sur la partie supérieure du ballon rend la température encore plus homogène et protège le bouchon de caoutchouc contre les atteintes de la chaleur.

La partie distillée est neutralisée par l'ammoniaque, puis additionnée d'acide chlorhydrique en excès, enfin traversée par un courant d'hydrogène sulfuré qui précipite l'antimoine. Le sulfure d'antimoine est filtré, lavé avec une solution d'acide sulfhydrique, puis dissous dans un mélange à volumes égaux de cyanure de potassium à 20 pour 100 et de sulfure de sodium concentré (de densité 1,22 et préparé suivant les indications de Classen). La solution ainsi obtenue, qui doit occuper un volume de 220 cc, est introduite dans un verre de Bohême de 6 cm de diamètre; on y plonge les électrodes, qui doivent se trouver complètement immergées, et l'on fait passer un courant de 0,05 ampère pendant une nuit. L'antimoine se dépose intégralement et forme un dépôt métallique gris d'acier très adhérent. Pour avoir un dépôt très adhérent, il ne faut pas dépasser 0,05 g comme quantité d'antimoine à déposer.

Dosage de l'or (à l'état métallique) [1]. — 100 g de cuivre sont dissous dans 750 cc d'acide nitrique de densité 1,2; après dissolution, on fait bouillir pour chasser les vapeurs nitreuses et l'on filtre.

Le filtre qui contient tout l'or est séché, puis le tout est brûlé. On coupelle le résidu de la combustion avec du plomb et un petit morceau d'argent. Le bouton d'argent obtenu par coupellation, et qui contient tout l'or, est dissous dans de l'acide nitrique de densité 1,2. L'or resté insoluble est séché et pesé.

Détails de l'opération. — Combustion du filtrat : le filtre et

[1] D'après Riche.

son contenu sont déposés sur une petite feuille de plomb pur, aussi mince que possible, ayant la forme d'un carré de 7 cm de côté environ (les feuilles que nous employons ont été laminées et pèsent environ 20 g). On allume le filtre, puis on le laisse se consumer tout seul; après la combustion, on dépose sur la petite feuille de plomb un morceau d'argent de quelques centigrames. Enfin on enveloppe le tout avec la petite feuille de plomb en formant un petit paquet aussi serré que possible. On porte celui-ci au moufle dans une coupelle déjà rouge. Après la coupellation, le petit bouton obtenu est placé dans un matras d'essayeur rempli au $\frac{1}{3}$ par de l'acide nitrique pur (exempt de chlore), de densité 1,2. On chauffe lentement le matras légèrement incliné, jusqu'à ce que les vapeurs nitreuses aient été chassées. On décante ensuite avec le plus grand soin le liquide clair, puis on remplit le matras au tiers avec de l'eau et l'on décante de nouveau. On recommence le lavage s'il y a lieu; enfin, on remplit complètement le matras d'eau, puis on le retourne brusquement dans un petit creuset en terre dit *creuset à recuire*. Lorsque l'or s'est bien déposé dans le creuset, on relève le matras. L'eau qui reste dans le creuset est décantée et celui-ci est porté au bord d'un moufle; lorsqu'il est bien sec, on l'introduit à l'intérieur du moufle où il est porté à la température du rouge sombre pendant quelques minutes. Après refroidissement, l'or, qui doit être bien jaune, est versé sur le plateau d'une balance d'essayeur et pesé.

Dosage du soufre (*à l'état de sulfate de baryum*). — On attaque de 5 à 20 g de cuivre, suivant sa richesse en soufre, par de l'eau régale chargée d'acide nitrique, et l'on dose le soufre dans la liqueur par les méthodes connues.

QUATRIÈME SECTION.

SYSTÈME TÉLÉPHONIQUE A BATTERIE CENTRALE;

PAR M. H. ANDRÉ.

Le but envisagé est d'obtenir le meilleur service possible, tout en réduisant au minimum les dépenses du matériel, du personnel et de l'entretien pour l'installation et l'exploitation des lignes d'abonnés auxiliaires et interurbaines.

Lignes d'abonnés. — Les conditions à remplir pour assurer un bon service téléphonique sont les suivantes :

Réduire au minimum le temps employé à mettre deux abonnés en communication ;

Signaler automatiquement la réponse de l'abonné à l'opératrice, de façon à ne plus l'astreindre à rester sur écoute tant que l'abonné demandé n'a pas répondu, et à lui permettre de s'occuper entre temps des autres communications ;

Signaler automatiquement la fin de la communication à l'opératrice. Le signal de fin doit être positif et d'une précision telle qu'il ne puisse pas donner lieu à une erreur d'interprétation de la part de la téléphoniste, afin de permettre à cette dernière de contrôler efficacement les communications sans devoir se mettre sur écoute ;

A l'aide d'une statistique exacte du trafic du bureau, établir la répartition équitable du travail entre les opératrices.

a. Pour réduire au minimum le temps qui s'écoule entre l'appel de l'abonné et la réponse de l'opératrice, il faut que la manœuvre d'appel imposée à l'abonné et la manœuvre de réponse de l'opé-

ratrice soient réduites au minimum. Or, la Batterie centrale supprime la manœuvre d'appel de l'abonné par le fait que l'appel se produit automatiquement lorsque l'abonné décroche son récepteur. Ce système a, de plus, l'avantage de supprimer les piles ou générateurs d'appel des postes d'abonnés.

Pour réduire au minimum la manœuvre de réponse de l'opératrice, il faut que le signal d'appel soit d'une netteté parfaite et que le jack local correspondant à ce signal puisse être déterminé instantanément sans erreur ni hésitation possibles.

L'efficacité du signal d'appel est obtenue en le plaçant dans le champ visuel le moins fatigant et le plus rapproché possible de l'opératrice, de façon que cette dernière, pour percevoir le signal, n'est pas obligée d'écarter ses yeux de leur position de repos.

Ce champ visuel comprend la place habituellement occupée par les jacks locaux, qui est la place tout indiquée pour les signaux d'appel.

Il est évident qu'en associant le signal d'appel directement au jack local qui lui correspond, on facilite la recherche du jack local. Mais la place occupée par les jacks locaux étant très précieuse, elle doit être ménagée et il importe de réduire au minimum les dimensions des signaux d'appel et des jacks locaux, sinon on diminuerait outre mesure la capacité des panneaux réservés aux jacks généraux.

Le signal d'appel est actionné tant que l'abonné maintient son récepteur décroché et il revient au repos dès que le récepteur est remis au crochet. L'opératrice, en répondant à un appel, a donc la certitude que l'abonné appelant est présent à son poste. Elle ne doit donc pas s'occuper des appels résultant du fait que le récepteur à été décroché par inadvertance ou résultant de toute autre cause. Il en résulte que le rendement du travail de l'opératrice est augmenté.

Le type de signal répondant le mieux à ces conditions est une lampe à incandescence disposée dans un godet ayant les mêmes dimensions qu'un jack local. Ceci permet de placer les signaux d'appel dans des réglettes semblables aux réglettes de jacks locaux, de sorte que la superposition de deux de ces réglettes permet d'obtenir la correspondance des signaux d'appel et des jacks locaux. De plus, aucun signal ne présente une efficacité plus grande, ni

une visibilité plus parfaite que la lampe à incandescence dont l'éclat attire les yeux et fixe l'attention de l'opératrice à un degré beaucoup plus grand que n'importe quel autre signal. La lampe à incandescence a surtout l'avantage d'être nettement perçue, quel que soit le plus ou moins bon éclairage du tableau commutateur.

La possibilité de placer le signal d'appel directement au-dessus du jack local correspondant permet de supprimer toute espèce d'indicatif sur le signal, puisque le numéro du jack local sert en même temps d'indicatif au signal d'appel. L'opératrice évite donc la fatigue intellectuelle de transformer le numéro du signal en numéro du jack local.

L'expérience démontre que les signaux d'appel formés par des lampes placées directement au-dessus du jack local facilitent énormément le travail de l'opératrice et augmentent notablement la rapidité du service.

Les capuchons des lampes pouvant être facilement enlevés et remis, il est aisé de modifier en peu de temps la couleur d'un signal suivant les besoins de l'exploitation. Le capuchon de verre opale a, de plus, l'avantage d'adoucir la lumière, de façon à ne pas fatiguer la vue de l'opératrice, et il diverge les rayons lumineux presque tangentiellement à la face antérieure du multiple, de sorte que les signaux peuvent être perçus latéralement. L'opératrice n'est donc pas obligée de tenir les yeux dans la direction des signaux d'appel, elle peut voir avec la même facilité les signaux des groupes voisins. De plus, pendant qu'elle regarde les jacks généraux, son attention est attirée dès qu'une lampe d'appel s'allume.

La lampe, comme signal d'appel et de fin de communication, est un des avantages secondaires du système à batterie centrale, et elle a été adoptée en remplacement des annonciateurs dans quelques bureaux importants n'ayant pas encore adopté le système complet de la batterie centrale.

En Europe, les plus importantes de ces installations mixtes sont :

Vienne : Un bureau équipé pour 10000 abonnés et d'une capacité totale de 13000 abonnés.

Vienne : Un deuxième bureau équipé pour 5000 abonnés et d'une capacité totale de 13000 abonnés.

Munich : Un bureau équipé pour 3600 abonnés et d'une capacité totale de 10800 abonnés en augmentation de 4000 (1).

b. Pour réduire au minimum le temps qui s'écoule entre le moment où l'opératrice reçoit la demande de l'abonné appelant et la réponse de l'abonné demandé, il faut d'abord que la conversation entre l'abonné appelant et l'opératrice soit réduite au minimum. L'abonné appelant énonce uniquement le numéro de l'abonné demandé et l'opératrice répète ce numéro tout en faisant le test et en enfonçant la fiche dans le jack de l'abonné demandé, puis elle met sa clef d'écoute et d'appel combinée sur appel.

La clef retourne automatiquement au repos, permettant ainsi à l'opératrice de gagner une manœuvre et de faciliter son service.

La clef combinée prend moins de place et coûte moins que les clefs séparées, abandonnées maintenant presque partout. A la fiche de réponse ne doit pas correspondre une clef d'appel, puisque la lampe d'appel ne reste allumée que tant que l'abonné appelant maintient le récepteur décroché.

c. Pour permettre à l'opératrice de s'assurer du moment précis où l'abonné demandé répond à son appel, sans devoir se mettre sur écoute, il suffit d'associer à la fiche d'appel un signal de supervision qui indique automatiquement la réponse de cet abonné. Il suffit donc que l'opératrice surveille ce signal de supervision. Si la réponse de l'abonné demandé tarde à se faire, elle peut renouveler l'appel en agissant sur la clef.

d. Il est essentiel que le signal de fin de communication soit donné aussitôt que la conversation est terminée, afin de permettre à l'opératrice du bureau central de libérer les lignes et de ne pas immobiliser inutilement une paire de cordons avec leurs clefs combinées, leurs deux relais et lampes, leurs translateurs, etc. L'utilisation économique de cette série d'appareils avec la place occupée mérite l'attention.

Si une manœuvre supplémentaire est demandée aux abonnés pour donner le signal de fin de communication, ils la négligent très souvent. Il en résulte pour les abonnés le double inconvénient

---

(1) Pour la description complète de l'installation de Munich, voir *Electrotechnische Zeitschrift,* 23 et 30 août 1900.

d'immobiliser inutilement leurs lignes et les cordons du bureau central, de sorte que leur rendement diminue très sensiblement. Les abonnés ont tout intérêt à faire libérer leurs lignes immédiatement après la fin d'une communication. C'est en effet le seul moyen de leur permettre d'être remis sans perte de temps en communication avec un nouveau correspondant.

Étant admis qu'on ne peut pas compter sur les abonnés pour actionner les signaux de fin, on a cherché à rendre ce fonctionnement automatique, en le faisant dépendre du fait que les deux abonnés ont remis leurs récepteurs au crochet.

Chaque abonné, en raccrochant son récepteur, actionne le signal de supervision du cordon qui lui correspond. L'opératrice rompt la communication lorsque les deux signaux de supervision de la paire de cordons sont simultanément actionnés.

Le signal de fin de communication donné par les deux signaux de supervision, associés aux deux fiches d'une même paire de cordons, ne donne lieu à aucune fausse interprétation. L'opératrice peut donc rompre la communication sans être astreinte à se mettre sur écoute. La suppression de l'obligation pour elle de se mettre sur écoute pour s'assurer qu'une communication est terminée élimine l'inconvénient très grave de troubler la conversation des abonnés qui entendent l'opératrice leur crier à l'oreille : « Fini?... fini? » Il est peu agréable, pour les abonnés, que l'opératrice interrompe la conversation. De plus, cela amoindrit la confiance dans le secret des communications. Ces interruptions sont non seulement une source d'ennuis pour les abonnés, mais aussi une perte de temps et une cause d'énervement pour les opératrices. Pour s'affranchir de ces inconvénients, il suffit de rendre le signal de fin précis et tel qu'il ne puisse pas donner lieu à une erreur d'interprétation.

Le signal de fin donné par deux signaux de supervision associés aux deux fiches d'une même paire de cordons répond à ces conditions, car ces signaux permettent à l'opératrice de contrôler la communication pendant toute la durée de la conversation, sans l'astreindre à se mettre sur écoute. Les meilleurs signaux de supervision expérimentés à ce jour sont les lampes à incandescence placées dans des godets disposés en regard des fiches correspondantes.

e. Pour niveler le travail entre les différentes opératrices d'abonnés, il faut commencer par établir la valeur exacte de chaque ligne d'abonné. Des statistiques établies avec soin font connaître la moyenne du nombre de communications demandées par chaque abonné aux différentes heures de la journée. Il suffit ensuite de se baser sur ces statistiques pour répartir les lignes entre les opératrices de façon à niveler le trafic.

La capacité maxima de travail d'une opératrice étant connue, il faut que la répartition des lignes soit telle que jamais aucune opératrice, à aucune heure de la journée, ne soit astreinte à un travail dépassant ce maximum.

La répartition des appels parmi les opératrices est assurée par l'emploi du répartiteur intermédiaire.

Comme des modifications très notables ont souvent lieu dans les lignes et dans le trafic, il faut que le répartiteur intermédiaire permette une mutation avec aisance et sans perte de temps. La pratique démontre qu'un tel résultat ne peut être obtenu que par l'emploi d'un répartiteur intermédiaire indépendant, disposé entre les jacks généraux et les jacks locaux du multiple.

Le rôle du répartiteur intermédiaire consiste uniquement à permuter les jacks locaux sans toucher aux jacks généraux, de façon à ce qu'une même ligne garde toujours le même numéro, c'est-à-dire reste toujours reliée aux mêmes jacks généraux, quelle que soit la place occupée par le jack local dans le multiple.

La connaissance du numéro de l'abonné appelant n'a aucune utilité pour le service ordinaire; cette utilité ne se produit qu'en cas de demande pour une ligne interurbaine ou en cas de réclamation, de recherches, de dérangements, etc.

D'après ce qui précède, on voit que le nivellement du trafic ne peut être obtenu que par l'établissement de statistiques très soignées et par l'emploi de répartiteurs intermédiaires indépendants.

Les bases fondamentales pour dessiner un commutateur téléphonique découlent des données fournies par les statistiques. Il n'est pas possible d'imposer un nombre déterminé d'abonnés par opératrice sans connaître la valeur de ces abonnés. Tout ce qu'il est possible d'imposer, c'est le nombre maximum de communications qu'une opératrice peut établir en 1 heure. On répartit ensuite les lignes entre les différentes opératrices de façon qu'elles aient

toutes, au moment le plus actif de la journée, à peu près le travail maximum qu'on peut exiger.

Lignes auxiliaires. — Pour obtenir un rendement maximum, il faut satisfaire aux conditions suivantes :

f. La demande d'une ligne auxiliaire doit être faite au départ au moyen de lignes de service aboutissant aux récepteurs des opératrices d'arrivée, qui peuvent ainsi indiquer le numéro de la ligne à employer au départ.

g. L'appel de l'abonné demandé doit être fait automatiquement par l'opératrice d'arrivée, et la durée de cet appel doit pouvoir être contrôlée par l'opératrice de départ dont le signal de supervision indique à la façon ordinaire le moment précis de la réponse de l'abonné demandé.

h. Le contrôle de la communication doit être réservé entièrement à l'opératrice de départ, qui seule reçoit le signal de fin à la façon ordinaire. L'opératrice d'arrivée reçoit un signal automatique de fin aussitôt que la communication est rompue au départ.

i. A l'arrivée, un signal doit indiquer si la ligne est oui ou non occupée au départ de façon à empêcher que l'opératrice d'arrivée n'indique le numéro d'une ligne non encore libérée au départ. L'emploi des lignes de service pour la transmission des numéros des abonnés demandés n'offre aucun inconvénient. L'expérience a prouvé qu'aucune confusion n'était à craindre.

L'opératrice de départ dispose d'un jeu de clefs reliées aux lignes de service, et à chaque clef peut au besoin correspondre un signal visible qui indique si la ligne de service est libre ou non. Or, comme chaque opératrice dispose de plusieurs lignes de service vers chacun des autres bureaux du réseau, elle peut toujours choisir une ligne inoccupée pour transmettre le numéro de l'abonné demandé. L'emploi de ces signaux visibles a de plus pour avantage de niveler le service entre les opératrices d'arrivée.

Lignes interurbaines. — Les conditions à remplir pour obtenir un rendement maximum sont les suivantes :

j. Ne faire tenir aucune écriture aux opératrices qui manipulent les lignes interurbaines.

k. Inscrire automatiquement l'heure exacte du commencement et de la fin de la communication, et permettre à l'opératrice de connaître le moment précis où la communication va dépasser la durée maxima tolérée.

l. N'établir une communication qu'après qu'elle a été amorcée aux deux bouts, de façon à ne jamais occuper inutilement une ligne interurbaine.

m. Amorcer les communications au moyen de lignes de service ou au moyen d'appareils télégraphiques utilisant la ligne interurbaine.

n. L'abonné demandant doit être mis en communication avec une opératrice spéciale (annotatrice) qui est chargée de mettre la demande au point et de faire amorcer la communication.

o. Donner à l'opératrice ordinaire le moyen d'immobiliser la ligne de l'abonné appelant au moyen du test secondaire jusqu'au moment où la communication demandée est établie ou jusqu'au moment où l'abonné renonce à sa communication.

p. Établir pour chaque communication interurbaine un ticket rendant impossible tout passe-droit, tout oubli ou erreur de la part de l'opératrice interurbaine. La comptabilité basée sur ces tickets doit être telle qu'aucune erreur ne puisse être faite sans être immédiatement signalée.

Comparaison entre l'ancien et le nouveau système. — Les Tableaux statistiques suivants, établis après une longue expérience pratique, font ressortir les avantages du système à batterie centrale, comparé à l'ancien système dit *à magnéto* (ou en dérivation).

	Ancien système.	Batterie centrale.
Moyenne du nombre d'appels par jour et par opératrice d'abonnés.....	1000	1800
Nombre maximum d'appels par heure et par opératrice d'abonnés.....	180	390
Moyenne du nombre d'appels par jour et par opératrice d'arrivée.....	2400	3250
Nombre maximum d'appels par heure et par opératrice d'arrivée.....	300	600

Le Tableau ci-dessus se rapporte aux réseaux téléphoniques des grandes villes comprenant plusieurs bureaux centraux reliés entre eux par des lignes auxiliaires à trafic intense.

Pour des réseaux téléphoniques à bureau central unique ou à faible trafic d'intercommunication, il y aurait lieu de modifier les chiffres ci-dessus, dont les proportions resteraient à peu près les mêmes, à l'avantage de la batterie centrale.

Qualité de la transmission téléphonique. — Ayant résumé les avantages résultant de l'emploi des signaux automatiques, qui assurent un service rapide, certain et économique, il reste à signaler le plus grand avantage de la batterie centrale au point de vue de l'abonné : la transmission claire et forte de la parole à la plus grande distance.

La source d'électricité centrale qui fournit l'énergie pour les appels automatiques alimente en même temps tous les microphones des postes d'abonnés.

Elle a une puissance de beaucoup supérieure à celle des piles locales de l'ancien système et, ce qui est très important, cette puissance reste toujours constante. Tous les abonnés étant reliés à la même batterie ont toujours une qualité de transmission égale et uniforme, ce qui améliore beaucoup le service du réseau.

Il ne suffit pas, en effet, que, de deux correspondants, un seul ait un bon appareil ; il faut que tous deux soient également favorisés, autrement une conversation est impraticable (on pourrait tenir un monologue, mais non pas une conversation).

L'amélioration du service et l'économie qui résultent tant de la suppression des piles locales que de la plus grande efficacité de travail des téléphonistes, constituent des avantages si absolus et évidents que la batterie centrale a déjà été adoptée aux États-Unis pour transformer presque tous les réseaux importants.

Dans beaucoup de cas, les bureaux abandonnés et déclassés comme surannés comprenaient un appareillage supérieur à celui qui existe dans la plupart des réseaux téléphoniques actuels d'Europe, car dans beaucoup de pays on n'est pas encore arrivé au système *Branching* ou en dérivation.

New-York, Chicago, Philadelphie, Boston, Saint-Louis, Cleveland, Detroit, Milwaukee, Buffalo, Pittsburg, etc., plus de

125 villes ont adopté la batterie centrale, qui fonctionne déjà pour plus de 137000 abonnés, nombre qui sera porté à 270000 au début du xxe siècle. L'équipement comprendra en outre plus de 25000 lignes auxiliaires, ce qui élèvera, rien qu'aux États-Unis, le nombre de lignes à batterie centrale à près de 300000.

Les communications sur les plus longues lignes interurbaines (1000 km à 2000 km) se font au moyen de la batterie centrale.

En Europe, les progrès sont plus lents, mais ce nouveau système fonctionne déjà en Angleterre dans la ville de Bristol, équipé pour 1800 abonnés. Il a été adopté par le Post Office pour son bureau de Londres (trois bureaux en construction, dont un pour 5400 et deux pour 1000), par la *National Telephone C°* pour quatre villes en dehors de Bristol : Londres, 2 bureaux (3600 et 2400 abonnés); Nottingham (1800 abonnés); Hull (1800 abonnés); Sunderland (1800 abonnés).

Sur le continent, il a été adopté par l'Administration des Télégraphes belge pour Bruxelles (5800 abonnés) et Liège (2000 abonnés), et par la Direction générale royale des Télégraphes et Postes de Roumanie pour Bucarest (1200 abonnés).

En tout, un équipement de 29600 abonnés à batterie centrale en Europe.

La capacité du bureau de Bruxelles sera de 14400 abonnés et celle du bureau principal de Londres, du Post Office, sera la même.

Le commutateur à batterie centrale exposé à Paris au Champ de Mars, au stand de la *Western Electric C°*, avait une capacité de 18000 abonnés.

APPLICATION DIRECTE D'UN RÉCEPTEUR TÉLÉPHONIQUE A LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL;

PAR M. A. POPOFF.

Au mois de mai 1899, comme je faisais, avec mes deux collaborateurs, M. Ribkine, préparateur à l'École des officiers torpilleurs à Cronstadt, et M. Troïtsky, capitaine du génie, des essais de télégraphie sans fil entre deux îles près de Cronstadt, les signaux, à un moment, cessèrent de parvenir au poste récepteur; voulant

vérifier cet appareil pour nous rendre compte de l'arrivée des ondes, j'introduisis un téléphone directement dans le circuit d'un radioconducteur et d'une pile sèche; à notre grand étonnement, les signaux envoyés par le même transmetteur étaient parfaitement entendus dans le téléphone. Ces essais, effectués les jours suivants, ont démontré que ces résultats ne pouvaient être obtenus qu'avec des radiations de faible puissance.

En essayant de téléphoner d'un navire stationnaire à un autre navire qui s'éloignait avec une vitesse constante, j'ai pu observer bien des fois le fait suivant : si l'on reste à bord d'un navire stationnaire pour recevoir, à l'aide d'un radioconducteur mis en série avec une pile sèche et un milli-ampèremètre, des signaux envoyés du navire qui s'éloigne, on remarque que, quand les distances entre les navires sont petites, la résistance du radioconducteur soumis à l'action des radiations devient inférieure à 10 ohms; puis, avec l'augmentation de la distance entre les navires, la variation de résistance n'est plus régulière et, à partir d'une certaine distance, la résistance atteint 1000 à 2000 ohms. Si la distance entre les deux navires augmente encore, la résistance du radioconducteur atteint 10000 ohms. Quand la résistance est d'environ 2000 ohms, si l'on ne donne pas de secousses au radioconducteur, on peut remarquer que l'aiguille du milli-ampèremètre, sous l'action des radiations, dévie légèrement dans les deux sens. Des essais ultérieurs nous ont montré que c'est précisément cette action des radiations qui donne le moyen d'utiliser directement les téléphones pour la télégraphie sans fil.

Pour les transmissions à grande distance, le modèle de radioconducteur que j'emploie se compose d'un tube de verre dans lequel sont collées de petites bandes de platine, sur lesquelles reposent des grains d'acier possédant plusieurs états d'oxydation à leur surface. Le tube, bien desséché, est fermé hermétiquement.

Les essais comparatifs m'ont démontré que ce modèle de radioconducteur est préférable à beaucoup d'autres; le phénomène peut être observé avec des radioconducteurs de bien des systèmes, mais dans des limites plus restreintes.

Par rapport à l'action des ondes électriques, la résistance du radioconducteur augmente et diminue à tour de rôle; il doit se produire, pendant ces actions successives, tantôt une fusion,

tantôt une oxydation entre les contacts mobiles du radioconducteur.

Le journal anglais *The Electrician* a publié un article de Hughes, l'inventeur du microphone, dans lequel ce savant, rappelant ses expériences avec sa balance d'induction, disait qu'il avait pu observer l'action des courants intermittents sur le microphone, et qu'il croyait que cet appareil était influencé par des perturbations électromagnétiques. Dans ce même article, Hughes ajoutait : « Le microphone combiné avec le téléphone peut mettre en évidence les radiations électromagnétiques »; mais, selon lui, les contacts métalliques ne sont pas propres à cet usage.

J'ai essayé plusieurs formes de microphones et je suis arrivé à la conclusion que le microphone ne peut servir de récepteur que pour des radiations puissantes. Mon récepteur radio-téléphonique ne pouvant mettre en évidence que les faibles radiations, cette propriété du radioconducteur à charbon de Hughes est très utile dans certaines circonstances.

J'ai démontré, dans le même but, que le charbon microphonique pouvait être combiné avec plusieurs métaux. De simples électrodes en métal ou en charbon dur, avec tiges métalliques, aiguilles, etc., permettent de reproduire ce phénomène intéressant. En juillet 1899 (brevet russe), j'ai indiqué l'utilisation pratique de ces phénomènes pour la télégraphie sans fil. Le récepteur comprend alors une pile mise en circuit avec un radioconducteur et un téléphone. Les influences atmosphériques et terrestres peuvent être atténuées et même supprimées par les moyens employés en télégraphie et en téléphonie. Cette nouvelle application des radioconducteurs Branly, du type Popoff, est intéressante par la simplicité du système; le relais des postes Popoff-Ducretet étant supprimé.

Pendant l'hiver de 1899, à cause de l'accident arrivé à un de nos cuirassés, *le Général Amiral d'Apraxine,* ce navire devait passer l'hiver bloqué contre un massif de rochers, sur les côtes de l'île Hohland, en plein golfe de Finlande. Comme dans cette saison on ne pouvait établir aucune communication entre l'île et le continent et le navire brise-glace *Ermack*, il était extrêmement important, pour les travaux de sauvetage du cuirassé, d'établir rapidement une communication par télégraphie sans fil entre ces deux points. Ce travail me fut confié. Deux détachements

furent formés pour l'installation des appareils sur l'île de Hohland, et sur un des petits îlots aux environs de la ville de Kotka.

A Kotka, l'installation était terminée le 20 janvier; le détachement de Hohland, après des difficultés très grandes, avait son installation prête vers le 28. Des premiers essais furent faits avec un cerf-volant afin de déterminer la bonne position du mât. Aussitôt les mâts installés, en ma présence, les dépêches furent envoyées et parfaitement reçues, puis transmises à l'État-Major de de la marine. Un glaçon s'étant détaché près de Zovensary avec des pêcheurs, une dépêche signée « Amiral Avelan » fut transmise au navire brise-glace Ermack en quelques minutes. La dépêche fut parfaitement comprise et le brise-glace porta de suite secours et sauva les 27 pêcheurs emportés en pleine mer par le glaçon. Cette application immédiate de ces appareils de télégraphie sans fil fit sensation.

Les postes, ainsi établis, furent laissés au soin du personnel, comprenant deux employés télégraphistes et un sous-officier électricien, pour surveiller l'appareil d'induction du transmetteur et ses accumulateurs. Les deux stations étaient munies de bobines Ruhmkorff, de Ducretet, du type transportable de cet habile constructeur, donnant des étincelles puissantes de 35 cm de longueur. La hauteur des mâts était de 48 m à Hohland et à Kotka. A Kotka, le mât était au milieu d'un bois ayant une longueur de 5 km dans la direction de Hohland.

Les transmissions furent établies régulièrement à partir de février jusqu'au mois d'avril pendant la durée des travaux de sauvetage du cuirassé, en même temps un poste était installé à son bord.

Pendant une durée de quatre-vingt-quatre jours, 440 télégrammes officiels furent échangés à des heures déterminées; la plus longue dépêche a été de 108 mots; c'était celle transmise aux journaux annonçant la nouvelle que le cuirassé était sauvé.

Pendant deux jours le fonctionnement ne put se faire par suite d'orages; il se rétablit ensuite. La neige était tellement épaisse que l'on ne pouvait distinguer un objet à une distance de 2 m, mais elle n'empêchait pas le fonctionnement régulier des appareils; on peut même dire que cet état améliorait la transmission parce que les décharges atmosphériques se faisaient moins sentir.

Je crois que ce service est le premier où le télégraphe sans fil a pu ainsi servir régulièrement et avec efficacité; il a démontré qu'il pouvait être pratiquement adopté entre ces îles jusqu'alors privées de tout moyen de communication télégraphique entre elles.

Entre Kotka et Hohland la distance est de 47 km; les difficultés d'installation furent très grandes, elles ne peuvent être comprises que par ceux qui ont eu l'occasion de visiter ces régions en hiver; on s'en rendra compte sachant que la température n'y monte jamais au-dessus de —12° et descend à —20° et plus bas; malgré cela le télégraphe sans fil a pu être installé en peu de temps et fonctionner avec régularité.

Je termine en témoignant ma reconnaissance à M. Ducretet qui a admirablement construit tous les appareils en service pour ces transmissions; pour les appels et pour enregistrer les signaux sur un récepteur Morse, les appareils qu'il a créés (appareils Popoff-Ducretet) seront d'un bon emploi. Les appareils radio-téléphoniques, par leur simplicité, rendront de réels services; ils recevront le développement qu'ils méritent.

SUR LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL;

PAR M. TISSOT.

La Communication que j'ai l'honneur de faire au sujet de la télégraphie sans fil sera très brève. Les conditions dans lesquelles nous exécutons nos expériences sont tout à fait spéciales et l'on comprendra les raisons très puissantes qui m'obligent à rester dans les généralités et à ne pas décrire les appareils dont nous nous servons, au moins dans tous leurs détails.

Ce qu'il m'est permis de dire, d'abord, ce sont les résultats que nous avons obtenus. Ces résultats, la presse en a rendu compte à notre insu, parfois d'une manière inexacte. J'ai donc le devoir strict de mettre les choses au point et de rectifier certaines erreurs involontaires qui ont pu se faire pour les distances franchies, qui étaient de 30 milles il y a quelques mois entre un bâtiment et la terre et ont été portées à 40 milles entre deux bâtiments. Ces dis-

tances ont toutes été obtenues avec des hauteurs d'antenne ne dépassant pas 26 m efficace ou 38 m au-dessus de l'eau ; ce sont les hauteurs que nous procurent les mâtures ordinaires des croiseurs et des cuirassés.

Il est clair que les extrémités supérieures des antennes se trouvaient hors de portée géographique. L'expérience montre d'une façon indiscutable que les communications s'obtiennent nettement dans de pareilles conditions, ce qui apporte une confirmation à la théorie exposée ici même par le distingué Dr Blochmann.

Ces communications, il est bon de le faire remarquer, ne consistaient pas en impressions fugitives du radioconducteur, mais bien en télégrammes complets, compliqués même parfois, car l'un de ces télégrammes par exemple portait l'indication du point du bâtiment obtenu par relèvements et télégraphié en latitude et longitude (degrés, minutes et secondes).

Ces résultats n'ont pu être obtenus qu'à l'aide d'un transmetteur puissant et d'un radioconducteur extrêmement stable. Le transmetteur était constitué par un transformateur Rochefort, modèle spécialement étudié et établi pour la télégraphie sans fil. Je ne puis entrer, pour les raisons exposées plus haut, dans la description de cet appareil qui diffère sensiblement des modèles que M. Rochefort a établis pour les applications de la haute fréquence. Ce qui caractérise ce tranformateur c'est une disposition spéciale de l'induit qui, placé dans un isolant pâteux, permet l'utilisation complète du flux magnétique développé par le primaire.

Le courant secondaire possède non seulement de la tension mais *de la quantité*. La bobine est d'ailleurs dissymétrique, c'est-à-dire que toute la différence de tension est répartie à l'un des pôles. Le pôle de basse tension se met nécessairement à la terre, circonstance éminemment favorable à l'application spéciale de la télégraphie sans fil.

Les étincelles obtenues avec l'antenne et la terre restent efficaces, je ne dis pas oscillantes car je n'en sais rien, jusqu'à des longueurs de 7 et 8 cm. Ce caractère ne se présente pas avec les bobines ordinaires dont j'ai essayé plusieurs modèles.

J'ai émis un doute au point de vue de l'oscillation de l'étincelle ; c'est plutôt au point de vue de la fréquence qu'on lui attribue communément que ce doute doit exister.

Si l'on dispose parallèlement à l'antenne d'émission une antenne de réception parfaitement isolée à quelques mètres seulement, cette antenne devient le siège de courants qui, devant être de haute fréquence, ne devraient pas avoir d'actions physiologiques. Or l'expérience montre le contraire.

En prenant à la main un conducteur parallèle à l'antenne d'émission et situé à une distance de quelques mètres on reçoit de violentes commotions.

Récepteur. — Le récepteur qui a été employé dans les expériences que je viens de citer comporte, comme tous les récepteurs type Marconi ou Popoff, un radioconducteur, un relais, un frappeur.

Le radioconducteur est du type à électrodes polarisées (décrit déjà à la Société de Physique et à l'Académie des Sciences). En principe, il est constitué par deux électrodes en métal magnétique, en fer doux de préférence, présentant un écart notable, sensiblement plus grand que dans les radioconducteurs ordinaires.

Le radioconducteur contient de la limaille magnétique et se trouve placé dans un champ magnétique dont les lignes de force sont parallèles à l'axe du tube. Les grains de limaille soumis à l'action du champ subissent ainsi une pression que l'on peut faire varier par degrés insensibles. Ces conditions assurent à la fois une grande sensibilité et un retour facile. L'expérience a montré que ces radioconducteurs présentent une grande *stabilité* et assurent la parfaite sécurité de réception des signaux aux distances indiquées.

DIRIGEABILITÉ DES APPAREILS DE TÉLÉGRAPHIE PAR LES ONDES ÉLECTRIQUES;

PAR M. LE Dr BLOCHMANN.

Les expériences de télégraphie par ondes électriques entreprises ces dernières années ont eu généralement pour but d'accroître le plus possible la portée des transmissions; on a essayé pour cela à la fois des générateurs très puissants et des récepteurs très sensibles.

Tandis que tous les efforts des divers opérateurs se sont portés vers ce point unique, on a négligé l'étude des phénomènes qui se passent dans le milieu soumis à l'action des ondes électriques, étude cependant fort intéressante.

Le milieu intéressé étant l'atmosphère de notre planète qui sépare les deux stations, nous concentrerons notre attention sur les phénomènes les plus connus de l'électricité atmosphérique.

C'est ainsi que les manifestations les plus fréquentes de l'état électrique de l'atmosphère, en un mot les orages, sont des sources puissantes d'ondes électriques; il est, en effet, un fait bien connu des télégraphistes que les orages troublent considérablement le fonctionnement des appareils et en particulier celui des cohéreurs.

Or l'étude de l'électricité atmosphérique nous apprend que la terre est entourée par des surfaces équipotentielles que l'on ne peut mieux assimiler qu'aux diverses pelures qui recouvrent un oignon. En temps normal, ces surfaces sont équidistantes si les objets qui sont à la surface n'ont pas de dimensions appréciables; dans le cas contraire, les surfaces équipotentielles ne sont plus équidistantes, elles s'accommodent de la forme de l'objet, que ce soit un édifice isolé, un clocher ou une montagne, de façon à ce que le sommet soit toujours au potentiel de la terre, mais non le potentiel d'un point situé à cette même hauteur et que l'on atteindrait avec un aérostat.

Si donc nous considérons un aérostat libre de tout lien avec le sol, il se trouvera porté au potentiel de la surface qu'il traverse. Si nous le relions au sol par un fil métallique, son potentiel redeviendra celui de la terre. Il y aura donc eu variation du potentiel sans s'être servi pour cela d'aucun appareil générateur; c'est un fait connu depuis Franklin.

Si l'on relie ce fil à un appareil générateur assez puissant et qu'on le soumette à des fluctuations de potentiel, ces fluctuations transmises le long du fil se communiqueront au milieu ambiant. L'équilibre des surfaces équipotentielles sera troublé de la même manière que la surface de l'eau tranquille d'un bassin est agitée quand on vient à y jeter une pierre.

La chute d'une pierre dans l'eau excite à sa surface une série d'ondes s'éloignant sous forme de cercles concentriques du point

frappé et qui ont pour effet d'animer toutes les particules situées à la surface du même mouvement qu'avait pris le corps en tombant.

De même, le fil employé en « télégraphie sans fil » pour la transmission provoque un dérangement analogue des surfaces équipotentielles qui s'étend de proche en proche jusqu'au fil récepteur.

Si nous supposons à la surface de l'eau du bassin pris plus haut comme exemple un morceau de bois à une certaine distance du point où est tombée la pierre, celui-ci se déplacera de haut en bas quand l'onde l'aura atteint, constituant un récepteur dans ce système où la pierre peut être envisagée comme le transmetteur.

Il en est de même en télégraphie sans fil, les ondes électriques créées par les appareils de la station de transmission seront reçues par le fil d'arrivée; elles pourront être perçues par des moyens acoustiques ou optiques.

L'opinon que nous venons d'émettre tendrait à montrer qu'il ne s'agit pas, en télégraphie sans fil, des ondes soi-disant hertziennes dans le sens propre, mais qu'il s'agit d'un phénomène analogue au mouvement ondulatoire de l'eau pouvant être regardé comme un dérangement oscillatoire de l'état atmosphérique normal provoqué par des moyens artificiels et selon la volonté de l'opérateur du poste de transmission.

A cette opinion nous apporterons trois arguments spéciaux :

1° Que les fils de transmission, pour une même longueur, ne produisent pas du tout le même effet, quand ils sont tendus horizontalement au lieu de l'être verticalement;

2° Que les fils de transmission qui sont tendus du haut d'une falaise au sol sans être conduits à travers l'air à une hauteur plus grande que le sommet ne donnent pas une transmission efficace, quoiqu'ils soient verticaux;

3° Qu'on a déjà envoyé des télégrammes par ondes électriques à des distances très grandes malgré la courbure de la terre, ce qui ne pourrait s'expliquer en supposant une propagation rectiligne.

Le premier point découle des observations de plusieurs expérimentateurs; il s'explique très bien avec notre théorie, puisque le fil de transmission, étant horizontal, ne coupe aucune surface équi-

potentielle; le commencement et la fin de ce fil sont donc dans des couches au même potentiel.

Quant au second point, nous citerons un fait observé en Angleterre où l'on réalisa une communication très mauvaise en établissant un des fils le long d'une falaise, mais sans en dépasser le sommet. Cette anomalie s'explique facilement si l'on remarque que le sommet de la falaise est au potentiel de la terre. Dans ce cas comme dans le cas précédent, le fil ne coupe pas de surfaces équipotentielles ou, en tout cas, elles sont peu nombreuses et elles sont traversées sous un angle très petit.

Si l'on suppose que ce soient des ondes hertziennes qui sont transmises le long du fil, la transmission devrait être la même pour tous les fils de même longueur, et elle serait indépendante de la direction des fils; malheureusement, les expériences ont prouvé le contraire.

Si, pour expliquer le troisième argument, nous ne supposons que la présence d'ondes hertziennes, il paraît impossible d'y arriver, à moins de supposer une réflexion par les images ou toute autre chose, les deux stations n'étant pas visibles à cause de la courbure de la terre.

L'expérience montre, en effet, que l'on a télégraphié à plus de 100 km de distance en employant des antennes de 40 m de hauteur seulement, alors qu'il faudrait plus de 200 m de hauteur pour joindre les sommets des antennes par une droite sans rencontrer la surface de la terre. Si l'hypothèse que nous venons de formuler sur la propagation des ondes électriques est exacte et si, en effet, elle consiste en un dérangement oscillatoire des surfaces équipotentielles de l'atmosphère, on en déduit facilement que l'indépendance des appareils de télégraphie sans fil peut être regardée comme impossible. Il ne faut pas perdre de vue, en effet, que l'indépendance qui doit régner entre les divers appareils de télégraphie a une importance capitale dans la plupart des applications que l'on compte en tirer. Pour les raisons théoriques que nous venons d'exposer, nous pensons que le secret des communications en télégraphie sans fil ne pourra être assuré qu'en dirigeant les études dans une voie nouvelle.

SUR L'APPLICATION DES MICROPHONES SOUS-MARINS A LA SÉCURITÉ DES PÊCHEURS DES BANCS DE TERRE-NEUVE ;

PAR LE GÉNÉRAL CHAYE-PACHA,
Lieutenant de vaisseau en retraite, Instructeur des torpilles en Turquie.

L'auteur de la présente Communication en avait fait déjà une sur les microphones sous-marins, au Congrès de 1889. Aujourd'hui, il traitera seulement de l'application qu'on pourrait faire de ces appareils pour permettre aux navires de pêche au mouillage d'éviter les abordages des navires à vapeur en marche et aux chaloupes de pêche égarées dans la brume de retrouver promptement leurs navires.

L'eau transmet les sons mieux et plus rapidement que l'air et l'on a fait depuis longtemps des expériences en vue de mettre ce fait en évidence. Vers 1830, on avait pu entendre, à grande distance, dans le lac de Genève, la bruit d'une cloche mise en branle sous l'eau, au moyen d'un tuyau métallique recourbé et terminé en forme de pavillon de cor de chasse, ce pavillon étant plongé également sous l'eau.

L'auteur de la Communication a eu l'idée, et l'a appliquée en juillet 1885 à Brest, le premier croit-il, de se servir de microphones enfermés dans des boîtes étanches plongées sous l'eau pour recueillir les bruits sous-marins, notamment ceux produits par les navires à vapeur. Ces microphones montés en série, sans bobines d'induction, avec une paire de téléphones et une pile, ont procuré au bout de quelques essais une audition parfaite des bruits d'un navire à vapeur en marche, à une distance de plusieurs kilomètres de la boîte microphonique, celle-ci pouvant naturellement être à courte ou grande distance des téléphones récepteurs, et être suspendue entre deux eaux ou reposer sur le fond de la mer.

Les microphones qui ont paru les meilleurs pour cette application sont les microphones Hughes, à crayon vibrant vertical et, pour le cas particulier envisagé aujourd'hui, on obtient de bons résultats en plaçant quatre de ces microphones, associés en dérivations, un sur chacune des faces verticales intérieures d'une boîte métallique étanche parallélépipédique, munie d'une anse de sus-

pension fixée à sa paroi supérieure, cette dernière présentant aussi une ouverture fermée par un bouchon-caoutchouc laissant passer les deux fils rejoignant la pile et les téléphones.

La corde de suspension de la boîte doit être rendue un peu élastique par interposition de caoutchouc pour éviter que les mouvements du navire qui placera la boîte à son arrière, à 5 ou 6 m au-dessous de la surface de l'eau, ne se répercutent trop vivement sur les crayons vibrants. Les téléphones, lorsqu'ils recevront des sons, seront actionnés par des courants continus, à intensité variable, mais toujours de même sens. Cette intensité devra être faible pour éviter de brûler les contacts des charbons et le courant devra passer dans les téléphones de façon à renforcer l'aimantation du noyau. Il est facile de trouver le sens convenable du courant, en essayant le courant dans les deux sens et en notant celui qui donne le plus de bruit dans les téléphones lorsqu'on ouvre et qu'on ferme rapidement le circuit.

L'usure de la pile sera faible, vu la grande résistance des téléphones, qu'on peut mettre aussi en dérivation dans le circuit-pile microphone, et la même pile pourra servir fort longtemps.

La pêche de la morue, sur le grand banc de Terre-Neuve et les bancs voisins, se fait au moyen des navires à voiles qui restent au mouillage pendant un temps assez long sur un point choisi des bancs et envoient des chaloupes ou des barques appelées *doris* placer dans les environs, quelquefois assez loin, des lignes de fond qui, ensuite, au bout de vingt-quatre heures environ, sont relevées par les barques qui rapportent les morues prises à bord.

Les navires sont exposés à être abordés et coulés en temps de brume, par les paquebots desservant les lignes reliant l'Europe et les ports du nord des États-Unis et les colonies anglaises de l'Amérique du Nord. Les barques de pêche sont exposées à s'égarer dans la brume et à ne plus retrouver leurs navires. Les exemples de ces deux genres d'accident sont malheureusement trop fréquents, et une Commission internationale a siégé longtemps pour chercher les moyens d'éviter les abordages des navires de pêche, en fixant aux paquebots des routes évitant les parages fréquentés par les pêcheurs; mais ces parages ont une étendue considérable et les paquebots ne sont pas d'ailleurs toujours maîtres de suivre une route fixée à l'avance.

Au moyen d'une boîte microphonique suspendue à 5 ou 6 m d'immersion, à l'arrière du navire pêcheur, l'homme de veille de ce navire pourra entendre dans les téléphones, munis de fils assez longs et maintenus à ses oreilles par une courroie appropriée, les bruits sous-marins causés par la machine d'un paquebot. L'adjonction des téléphones à ses oreilles ne causera aucune fatigue à l'homme et il pourra faire les cent pas sur le pont. Le paquebot sera signalé à plusieurs kilomètres (il y a des téléphones assez bruyants pour que même les hommes un peu durs d'oreille puissent encore entendre à assez grande distance, mais ces téléphones sont en général moins sensibles). L'homme de veille appréciera rapidement si le bruit augmente régulièrement et par suite si le paquebot fait une route menaçante pour le navire de pêche. Si la vision est entravée par les brumes, si épaisses et si fréquentes dans les environs de Terre-Neuve, des signaux sonores ou lumineux, ou les deux à la fois, seront faits, pendant tout le temps que les bruits du paquebot n'iront pas en diminuant franchement d'intensité, c'est-à-dire tant que le paquebot ne fera pas une route l'éloignant du navire de pêche au mouillage. Les signaux ne dureront jamais longtemps, vu les vitesses ordinaires des paquebots.

Les paquebots seront prévenus par les signaux sonores de l'existence d'un navire dans les environs et devront ralentir leur vitesse et veiller très attentivement pour pouvoir manœuvrer à temps. Les signaux lumineux, dès qu'ils seront aperçus, indiqueront la position du navire menacé et il sera alors très facile au paquebot de l'éviter.

Les signaux lumineux devront être faits à un point élevé de la mâture, et les hommes de veille des paquebots devront être placés aussi à une assez grande hauteur, les brumes de Terre-Neuve étant en général très denses et basses; souvent on ne voit pas à 5 m devant soi sur le pont, tandis qu'on peut apercevoir du pont le ciel; des points élevés, et encore mieux en montant dans la mâture, on apercevra les objets élevés, souvent à assez grande distance.

Des signaux lumineux qui paraissent simples sont des signaux faits au moyen de torches au magnésium, qu'on allumerait électriquement au moyen d'un fil de platine entouré d'un allumeur au coton-poudre en floches, et du courant de la pile microtélépho-

nique. On allumerait, au besoin, une série de torches de façon à faire un signal lumineux intense pendant le temps voulu.

Pour les signaux sonores, on pourrait avoir des sirènes marchant à l'air comprimé. Un réservoir de capacité assez faible pourrait suffire pour un ou deux signaux de durée suffisante et l'on n'aurait pas souvent à manœuvrer la pompe de compression destinée à recharger le réservoir, vu que les passages de paquebots, en un point donné, ne sont pas très fréquents. Les signaux à faire ne pourraient être naturellement adoptés qu'après une entente internationale des puissances intéressées, car, en marine, tout signal sonore ou lumineux doit avoir une signification précise, connue de tous, et le feu blanc élevé, par exemple, est exclusivement réservé aux navires à vapeur en marche, la sirène à vapeur aux navires à vapeur, etc.

Les barques de pêche devraient emporter, en plus de la boussole ordinaire, un appareil microtéléphonique. Elles immergeraient à 4 ou 5 m leur boîte microphonique quand elles seraient égarées et pourraient entendre les signaux, genre Morse, répétés périodiquement par leur navire au moyen de coups de marteau frappés dans la cale. Ces signaux s'entendent à grande distance. D'après l'accroissement ou la diminution des sons, les barques jugeraient si elles font bonne ou mauvaise route. Elles pourraient même trouver la direction d'où vient le son sous-marin avec des boîtes microphoniques, entourées, sur toutes leurs faces moins une des faces verticales, de matières amortissant les ondes sonores (double enveloppe de plomb et caoutchouc avec interposition de noir de fumée, par exemple). En tournant la boîte microphonique dans toutes les directions, on arriverait à percevoir des sons très renforcés lorsque la paroi non protégée serait tournée du côté du signal sonore, surtout si la paroi libre de la boîte était munie d'un cornet acoustique approprié concentrant les sons sur le centre, où sont appliqués les supports du crayon vibrant.

Étant donnés les accidents rentrant dans la catégorie indiquée, et malheureusement trop fréquents, qui arrivent aux pêcheurs de Terre-Neuve, l'auteur de la Communication pense que l'adoption des microphones sous-marins, dont il peut affirmer le bon fonctionnement, serait d'une grande utilité pour la sécurité de l'existence des pêcheurs de Terre-Neuve, et demande, si le bureau de

la IVe Section partage cette opinion, que sa Communication soit transmise à la Commission spéciale composée des délégués officiels des divers gouvernements, pour que l'attention des chambres de commerce des ports intéressés et des Sociétés de sauvetage ou d'assurance soient attirée sur cette question. Les appareils seraient d'un prix peu élevé et pourraient être très robustes, c'est-à-dire ne pas se déranger pendant toute une campagne de pêche, même maniés par des mains peu exercées.

L'auteur de la Communication n'a pas eu le loisir de faire d'expériences suivies sur les moyens à employer pour que les paquebots en marche puissent s'entendre venir de loin; il croit cependant que de grands téléphones, robustes, placés sous l'eau, c'est-à-dire la plaque vibrante faisant en quelque sorte partie de la partie immergée de la carène du navire, pourraient recueillir les ondes sous-marines sonores et les transmettre à l'oreille de l'officier de quart au moyen d'un autre téléphone relié au premier (système de Bell sans pile ni microphone). Avec un téléphone sous-marin, placé de la façon indiquée et à un endroit convenable de chaque côté d'une carène de navire au-dessous de la flottaison, on arriverait peut-être ainsi à savoir approximativement de quel côté viennent les sons suivant que le téléphone de droite ou de gauche ferait plus de bruit. On aurait ainsi des renseignements précieux pour éviter les abordages entre paquebots en marche.

Des essais pourraient être entrepris dans ce sens en attendant que la télégraphie sans fil se perfectionne et que son usage se répande assez pour que les chances d'abordages disparaissent presque complètement.

LES CANALISATIONS TÉLÉPHONIQUES SOUTERRAINES;

PAR M. ROOSEN.

L'Administration des Télégraphes, qui, en Belgique, exploite les réseaux téléphoniques, désireuse, d'une part, de maintenir les installations au courant des progrès faits en matière téléphonique, et forcée, d'autre part, d'étudier la transformation des réseaux

principaux, par suite du développement incessant du service et de la nécessité de soustraire celui-ci aux causes nombreuses de perturbation, nomma, en 1896, une commission chargée d'étudier la transformation, tant au point de vue des installations extérieures (mise sous terre des fils) qu'à celui des installations intérieures (commutateurs, appareils du bureau central, postes d'abonnés, dispositifs de protection, etc.).

Certains des membres de cette commission furent chargés d'aller étudier sur place, dans les villes principales des États-Unis d'Amérique et du continent, les dispositions adoptées pour les canalisations souterraines.

Appelé à faire partie de cette commission, l'auteur a pu examiner les différents systèmes et recueillir de nombreux renseignements.

Dans ce court résumé, il n'est pas possible d'entrer dans tous les détails : nous ne pouvons que citer les différents systèmes examinés.

Parmi ceux-ci, les systèmes dans lesquels les câbles sont simplement déposés dans le sol (dans ce cas, en général, il est fait usage de câbles armés) ont été écartés. Les membres de la commission avaient pu examiner ces systèmes à Rotterdam, où des câbles protégés par une armature ont été déposés sur le fond de tranchées de 50 à 60 cm de profondeur, et à Amsterdam, où la canalisation est constituée par un caniveau formé d'une carcasse en fils de fer noyés dans du béton (système Monnier). Cette canalisation est placée sous le trottoir et fermée par un couvercle formé de deux fers en U ou de deux fers cornières reliés par une tôle.

L'auteur pense, après examen approfondi des diverses canalisations, que les systèmes à tirage s'imposent d'une manière générale dans les villes.

Ces systèmes peuvent être classés suivant la nature de la matière employée : ils pourraient être subdivisés en deux grandes classes, la première comprenant les systèmes formés par des éléments indépendants, posés ou maçonnés; la seconde, les systèmes monolithes.

Nous passerons en revue les canalisations classées d'après la nature de la matière.

1° *Bois.* — Différents systèmes ont été employés : à Chicago, Boston, Philadelphie, on a fait usage de caniveaux constitués simplement par des planches en bois de hêtre ou de pin de Géorgie, assemblées entre elles par des clous, avec assemblages de tronçons consécutifs par des entailles à mi-bois.

Dans ces mêmes villes, on a mis à l'essai les conduites en bois foré, système Wyckoff, et celles en bois évidé ; les bois sont préparés et traités à la créosote. Ces systèmes sont abandonnés à peu près d'une manière générale. L'agent antiseptique employé pour la préparation peut attaquer le plomb des câbles.

Il a également été fait usage de tubes en bois durci, c'est-à-dire en fibre de bois, moulée et imprégnée de substances minérales.

2° Le *fer* sous différentes formes a été mis en œuvre. Il a été mis à l'essai des tuyaux en tôle posés bout à bout et noyés dans du mortier de ciment hydraulique, des tuyaux de même genre revêtus intérieurement de ciment sur une épaisseur de 16 mm environ, des tuyaux en fer étiré de 20 pieds de longueur, soit 6,10 m environ, et de 76 cm de diamètre intérieur, posés directement dans le sol ou dans du béton, avec couche de béton entre les assises des tuyaux, sur le fond de la tranchée et sur les parois latérales et supérieure. Des tuyaux en fonte, de diamètre variable, allant jusqu'à 0,60 m, dans lesquels on tire des câbles armés, ont été également mis à l'essai, notamment dans différentes villes de la Suisse.

Le système Johnstone, bien qu'employé surtout pour les canalisations d'éclairage, a été utilisé dans certaines villes américaines pour le reliement individuel des abonnés.

3° Les *agglomérés*, ciment, béton, ciment armé, terre cuite, grès, etc., ont été appliqués un peu partout.

Les conduites Dorsett, essayées en Amérique, le système Hultmann, mis en œuvre en Suède-Norvège, à Manchester, à Vienne, etc., sont les plus connus. Les canalisations Hultmann sont assez répandues.

Le système mis en œuvre à Stuttgart, dans lequel chaque caniveau peut recevoir 5 câbles à 28 paires de conducteurs, le système

de M. Zappe, qui a été employé à Francfort et dans d'autres villes de l'Allemagne, sont également bien connus.

Les tuyaux en terre cuite vernissée de différentes formes et dimensions, des maisons Mac Roy de Chicago, Doulton de Londres, H.-B. Camp et Cie d'Aultman (Ohio), etc., ont été employés et le sont encore dans certaines villes. Ces tuyaux sont à un, deux, trois, quatre et six compartiments, comme les fabrique la maison Doulton de Londres.

La commission a eu à examiner tous ces systèmes : d'autres lui ont été présentés par certains soumissionnaires.

Réseau téléphonique de Bruxelles. — Le réseau téléphonique de Bruxelles sera mixte, c'est-à-dire en partie aérien et en partie souterrain. Un système complètement souterrain, tel qu'il est appliqué à Paris et dans plusieurs grandes villes américaines, n'était pas réalisable à Bruxelles.

Dans la plupart des villes des États-Unis d'Amérique : New-York, Chicago, Philadelphie, Saint-Louis, etc., les rues et avenues tracées en ligne droite se coupent à angle droit, de manière à figurer un vaste échiquier et à former des blocs d'immeubles très importants. Les nombreuses places, aux différents étages de ces immeubles, servent de bureaux à des firmes industrielles ou commerciales raccordées d'une manière presque générale au bureau central téléphonique le plus proche. Ces villes se prêtent admirablement à l'installation d'un réseau complètement souterrain, par suite du très grand nombre d'abonnés compris dans chaque bloc, nombre tel qu'il justifie parfaitement l'amenée d'un câble principal, ou tout au moins secondaire, dans la cour du bloc et la distribution des conducteurs du câble aux différents postes d'abonnés.

La Ville de Paris met à la disposition de l'Administration des Télégraphes son réseau si complet d'égouts pour l'installation des câbles téléphoniques, ce qui rend possible l'accès de ceux-ci sur toute leur longueur et facilite les prises de dérivations.

Ces particularités n'existent pas à Bruxelles, et il a fallu s'arrêter au choix du système mixte, employé d'ailleurs dans nombre de villes du continent.

Le principe du système est le suivant : tout poste d'abonné est

relié par une ligne aérienne au point de dispersion le plus voisin; en ce point de dispersion, les deux conducteurs de la ligne de l'abonné se raccordent, par l'intermédiaire des accessoires nécessaires, aux deux fils d'un câble logé sous terre et aboutissant au bureau central téléphonique.

On choisit les points de dispersion de telle manière que les postes existants et ceux à installer dans la suite puissent être atteints autant que possible sans que la ligne aérienne ait à emprunter des supports intermédiaires entre l'immeuble de l'abonné et le point de dispersion. Les postes téléphoniques situés dans un certain rayon autour de l'Hôtel central des Téléphones sont raccordés aériennement par un chevalet de dispersion installé sur ledit hôtel.

De la salle d'amenée des câbles souterrains, située au deuxième étage de l'Hôtel des Téléphones nouvellement construit, rue de la Paille, ceux-ci emprunteront la cheminée des câbles aménagée sur toute la hauteur de l'édifice et descendront dans le sous-sol pour gagner un tunnel construit sous la rue de la Paille et dans lequel ils seront déposés sur des supports fixés dans les parois du tunnel; celui-ci débouchera à chaque extrémité de la rue de la Paille dans un trou d'homme. C'est à partir de chacun de ces trous d'homme que sera installée la canalisation spéciale.

De ces trous d'homme partiront donc des artères principales qui iront en se subdivisant en cours de route et formeront des branchements.

Ces artères desserviront chacune plusieurs points de dispersion : poteaux plantés dans le sol ou chevalets installés sur les toitures de certains immeubles.

Dans le but d'éviter des modifications et des changements très onéreux, de s'assurer la jouissance des toitures d'immeubles pendant un temps indéterminé, et pour d'autres considérations, on prévoit l'établissement des chevalets sur des édifices appartenant aux administrations publiques, État, province ou commune. Si ces édifices font défaut, ou s'ils ne se prêtent pas bien à cette installation, on aura recours à la plantation de poteaux.

Les câbles téléphoniques seront logés dans les canalisations prévues. Chacun des câbles ou les branchements pris sur ceux-ci seront amenés jusqu'au trou d'homme le plus voisin du point de

dispersion choisi. Les fils aériens seront raccordés, par l'intermédiaire des fils des câbles à isolement de caoutchouc, d'appareils protecteurs et de boîtes spéciales, dites *têtes de câbles*, aux conducteurs du câble armé posé directement dans le sol et débouchant dans le trou d'homme, où il vient se joindre et se rattacher à l'un des câbles logés dans les canalisations.

Le réseau souterrain a été étudié pour une capacité de dix-huit mille abonnés, en admettant que le plus gros câble dont on fera usage soit à deux cents paires de conducteurs, c'est-à-dire servira pour le raccordement de deux cents abonnés.

Le réseau de Bruxelles aura un développement total de 35 km environ, dont 27465 m étaient achevés à la fin de juillet 1900. Il comprendra 69 points de dispersion dont 24 poteaux en acier pour 200 paires de fils et 45 chevalets sur toiture de capacité variable (330 paires et moins).

A la suite de l'étude comparative des systèmes de canalisations employés dans les différents pays, l'Administration des Télégraphes de Belgique a décidé de mettre en œuvre des tuyaux spéciaux fabriqués par H.-B. Camp et Cie à Aultman, Ohio (États-Unis).

La matière première de ces tuyaux est de l'argile choisie et préparée. Les produits de la fabrication sont soumis à une haute température maintenue pendant un temps suffisant pour vitrifier la matière et lui donner les qualités requises pour son emploi dans la construction des canalisations souterraines.

Il faut en effet que les produits fabriqués résistent à l'écrasement, aux chocs et aux vibrations. La matière première doit être de nature telle qu'elle ne puisse réagir chimiquement sur le plomb formant la couverture des câbles et que, d'autre part, les différents agents ou produits renfermés dans le sous-sol des grandes villes ne puissent l'attaquer : elle doit être imperméable, susceptible de prendre un certain degré de poli, de telle manière que la surface intérieure des pièces fabriquées ne présente ni arêtes, ni rugosités capables de détériorer le câble pendant l'opération du tirage; enfin elle doit posséder certaines qualités isolantes au point de vue électrique.

Les pièces à utiliser doivent être de formes et de dimensions telles que la pose soit simple, facile et rapide. Le système doit

assurer une étanchéité parfaite aux joints, et être suffisamment flexible pour permettre de tourner sans difficultés les obstacles nombreux rencontrés dans le sous-sol des villes; enfin, la question de prix doit entrer en ligne de compte. L'Administration a cru trouver toutes ces qualités réunies dans les produits fabriqués par la maison Camp et dans le mode de pose adopté et décrit ci-après.

Formes et dimensions des pièces. — La section extérieure des tuyaux est carrée, avec les arêtes embrevées. Ils présentent sur chacune des faces des rainures peu profondes, parallèles aux arêtes. La section intérieure est circulaire et de diamètre variable, de 2, 2,5, 3, 3,5, 4 pouces, c'est-à-dire de 50,8, 63,5, 76,2, 89 et 101,6 mm. Les tuyaux posés à Bruxelles ont 84 mm de diamètre, leur longueur est de 18 pouces, soit 46 cm environ. Les abouts sont légèrement évasés et arrondis. D'après les conditions du cahier des charges, les ouvertures doivent être parfaitement centrées et de dimensions uniformes.

Mise en place des tuyaux. — Aux endroits choisis pour l'emplacement des trous d'homme, on commence par faire les fouilles nécessaires à l'établissement de ceux-ci, de manière à s'assurer que des obstacles imprévus, non relevés dans l'étude de l'avant-projet, ne s'opposent pas à la construction. Entre les trous d'homme, on creuse la tranchée destinée à recevoir les canalisations : cette tranchée doit être en ligne droite, autant que possible; ses dimensions en profondeur et en largeur sont déterminées d'un côté par le nombre de caniveaux, de l'autre par la nature et l'étendue des obstacles, tels que tuyaux d'eau, de gaz, égouts, etc., qui pourraient être rencontrés. La face supérieure des canalisations doit, en règle générale, se trouver à 0,7 m au moins du niveau du sol.

Le fond de la tranchée, parfaitement damé et égalisé, maintenu étanche, s'il y a lieu, reçoit une pente légère et uniforme d'un trou d'homme vers l'autre, de telle manière que l'eau ne puisse séjourner dans les canalisations. Parfois la pente se donne vers les deux trous d'homme et la canalisation entre ceux-ci forme dos d'âne.

Sur le fond de la fouille, préparé comme il vient d'être indi-

qué, on dépose une couche de béton de 10 cm d'épaisseur minima et d'une largeur égale à celle nécessaire pour recevoir la première assise de tuyaux, augmentée de chaque côté de 10 cm. Cette couche de béton est maintenue dans un coffrage en bois, préparé d'avance : elle est parfaitement pilonnée.

Le béton mis en œuvre est formé de 2 parties en volume de mortier de ciment et de 3 parties en volume de pierrailles, briquaillons et galets. Le mortier de ciment est composé de 550 kg de ciment artificiel *à prise lente* et de 1 m³ de sable ou gravier fin, sec, graveleux et dégagé de toute partie terreuse ou d'autres corps étrangers. Les pierrailles, briquaillons ou galets sont exempts de terre, vase, schiste, de toute matière gélive ou friable, de mortier. Leurs dimensions ne peuvent dépasser 2 cm³.

Lorsque la couche de béton a fait prise, on pose les tuyaux en commençant par le milieu de la tranchée et en utilisant à cet effet des brigades d'ouvriers qui vont en s'éloignant et en se dirigeant vers les trous d'homme extrêmes.

Les tuyaux sont posés au mortier de ciment (de la composition indiquée ci-dessus) à joints rompus, tant dans les assises horizontales que dans les assises verticales, comme une maçonnerie de briques ordinaires. Les joints sont faits au mortier de ciment.

Câbles. — Les câbles mis en œuvre dans le réseau de Bruxelles sont à isolement d'air et de papier sec. Il sera cependant fait usage de câbles à isolement de caoutchouc pour le raccordement des câbles à papier aux fils aériens.

Les câbles à isolement d'air comporteront 50, 75, 100, 150 et 200 paires de conducteurs. Ceux-ci seront en cuivre de la meilleure qualité, d'un seul brin de 0,8 mm de diamètre. Des câbles à 25 paires de conducteurs de 2 mm de diamètre serviront à raccorder le bureau central aux têtes des lignes aériennes interurbaines et internationales qui se trouvent aux gares du Nord et du Midi.

Les câbles doivent répondre aux conditions prescrites par le cahier des charges.

La conductibilité du cuivre employé sera au moins égale aux 98 pour 100 de celle du cuivre pur défini par la résistance à 0° C. d'un kilomètre de fil de ce métal de 10 mm de diamètre, laquelle doit être égale à 20,29 ohms internationaux.

L'isolement de chaque conducteur mesuré à l'aide d'une force électromotrice au moins égale à 500 volts, l'enveloppe métallique et les conducteurs autres que celui soumis aux essais étant reliés à la terre, ne devra pas être inférieur à 800 méghoms par kilomètre. Cet essai devra être fait à l'usine du fournisseur à la température ambiante et après 1 minute d'électrisation sans correction de température. Pour éviter tout accident pendant ces essais, il sera intercalé dans le circuit une résistance de 200000 ohms.

L'isolement de chaque conducteur mesuré avec une force électromotrice d'au moins 140 volts, l'enveloppe métallique et les conducteurs autres que celui soumis à l'essai étant reliés à la terre, ne devra pas être inférieur à 500 méghoms par kilomètre, après la pose, c'est-à-dire lorsque tous les joints et tous les raccordements aux extrémités seront terminés et que le câble sera prêt à être employé. Cet essai sera fait à la température ambiante après 1 minute d'électrisation et sans correction de température.

Pour les câbles à fils de 0,8 mm de diamètre, la capacité électrostatique moyenne ne pourra dépasser 0,06 microfarad par kilomètre après 15 secondes de charge, l'enveloppe de plomb et les conducteurs autres que celui soumis à l'essai étant reliés à la terre.

La capacité électrostatique d'un fil quelconque, ainsi mesurée, ne pourra dépasser 0,065 de microfarad par kilomètre.

Pour les câbles à fils de 2 mm de diamètre, essayés dans les mêmes conditions, les chiffres sont portés respectivement à 0,08 et à 0,085 de microfarad.

Les câbles devront remplir certaines conditions quant à l'induction mutuelle.

Les câbles à isolement de caoutchouc et à armature de plomb allié de 3 pour 100 d'étain auront 25 et 50 paires de conducteurs de 0,8 mm de diamètre. Les conducteurs seront en cuivre étamé d'un seul brin. Le cuivre aura une conductibilité au moins égale à 0,96 de celle du cuivre pur défini comme ci-dessus. L'isolement sera obtenu par une couche de caoutchouc pur et une couche de caoutchouc vulcanisé; l'épaisseur de l'isolant ne pourra être inférieure à 1,2 mm. L'isolement de chaque conducteur mesuré à l'aide d'une force électromotrice au moins égale à 140 volts, l'enveloppe métallique et les conducteurs autres que celui

soumis à l'essai étant reliés à la terre, ne pourra être inférieur à 2000 méghoms par kilomètre. Cette mesure sera prise après immersion du câble entier pendant au moins 24 heures dans de l'eau maintenue à la température constante de 15° C. et après 1 minute d'électrisation.

Les câbles sont fournis en partie par la maison Felten et Guilleaume de Mulheim-sur-Rhin et en partie par la firme Siemens et Halske de Berlin. Cette dernière fabrique les câbles pour le réseau de Bruxelles dans son usine de Florisdorff, près de Vienne.

Bien que répondant aux spécifications du cahier des charges, les câbles livrés par les deux firmes sont de types quelque peu différents. Dans ceux de la maison Siemens et Halske, les deux conducteurs d'une même paire sont l'un en cuivre rouge et l'autre en cuivre étamé. Chacun d'eux est recouvert de deux bandes de papier sec de 8 mm de largeur, enroulées en hélice, se recouvrant en partie : les deux hélices sont de sens contraires. Les deux conducteurs ainsi recouverts sont ensuite tordus l'un autour de l'autre, le pas de l'hélice de torsion étant de 20 cm environ. Toutes les paires ainsi constituées sont câblées en couches concentriques : les différentes couches sont elles-mêmes disposées en hélice en sens inverses l'une de l'autre.

L'ensemble des couches maintenu par une bande de toile est revêtu d'une gaine d'un alliage de plomb et d'étain, la quantité d'étain ne pouvant être inférieure à 3 pour 100 en poids (97 pour 100 de plomb et 3 pour 100 d'étain). L'épaisseur de la gaine de plomb allié d'étain est de 3 mm pour les câbles à 75, 100, 125, 150 et 200 paires de conducteurs et de 2,5 mm pour les câbles à 25 et à 50 paires.

La firme Felten et Guilleaume fournit deux types différents, celui à enroulement en S, c'est-à-dire dans lequel les deux fils d'une même paire sont entourés de deux bandes de papier disposées en S de manière à séparer les deux conducteurs, et celui dans lequel chaque fil est revêtu d'une bande de papier repliée en forme de triangle, et les deux fils d'une même paire sont ensuite enveloppés d'une même bande de papier enroulée en hélice.

Dans l'un et dans l'autre type, le pas de l'hélice formée par la

torsion des deux conducteurs d'une même paire ne pourra être supérieur à 25 cm. Les conducteurs arrangés en couches et celles-ci câblées sont revêtus d'une bande de coton, puis d'une gaine de plomb allié d'étain de même composition et de même épaisseur que celle prévue pour les câbles Siemens et Halske.

Dans chaque couche des câbles, deux paires voisines de conducteurs sont différenciées par l'emploi de bandes de papier rouge et bleu, et ce dans le but de faciliter le numérotage des fils, leur recherche et le raccordement des bouts de câbles entre eux.

Entre le point de dispersion et le trou d'homme le plus voisin il sera fait usage de câbles armés posés directement dans le sol. Ces câbles armés auront 25, 50, 75 et 100 paires de conducteurs. Ils répondront aux spécifications indiquées pour les câbles sous plomb nu : la gaine de plomb allié à 3 pour 100 d'étain aura une épaisseur de 2,5 mm pour les câbles à 25 et 50 paires et de 3 mm pour les câbles à 75 et 100 paires. Cette gaine sera recouverte d'une enveloppe protectrice, puis d'une armature en fils de fer galvanisé à section trapézoïdale de 4,7 . 4,3 . 1,7 mm.

L'isolement des câbles au papier sec ne se maintenant que si l'air renfermé dans les câbles reste sec, il faut que celui-ci puisse circuler sur la longueur du câble et qu'il puisse en être expulsé le cas échéant, s'il devenait humide. A cet effet, le cahier des charges prévoit que chaque bobine de câble devra être soumise à l'épreuve suivante dans les usines de l'adjudicataire : quand, par l'une des extrémités d'un câble d'une certaine longueur, on injectera de l'air à une pression comprise entre 1,900 et 2,100 kg par centimètre carré, l'air devra commencer à se dégager à l'autre extrémité en moins de 90 secondes pour un câble de 150 m de longueur et en un temps proportionnel à la longueur si le câble a moins de 150 m, la durée étant réglée sur le pied de 90 secondes pour une longueur de 150 m.

Après cet essai, les extrémités du câble seront injectées sur une longueur de 50 à 60 cm, parfaitement déterminée, de substance isolante. Cette longueur d'injection sera telle que dans les trous d'homme on puisse avoir accès à la partie non injectée des câbles et que, par forage d'un trou dans la gaine de plomb et à l'aide d'un ajutage, on puisse souffler de l'air sec d'un trou d'homme à

l'autre sur toute la longueur du câble et relever ainsi l'isolement des parties défectueuses.

Aux points de dispersion, chevalets ou poteaux, dont il sera question plus loin, seront installés les appareils dits *têtes de câbles,* auxquels aboutissent les câbles armés. Le raccordement des têtes de câbles aux appareils de protection (parafoudres et fils fusibles) et celui de ces derniers aux fils aériens se feront par l'intermédiaire de câbles à isolement de caoutchouc à 25 et 50 paires de conducteurs.

Pose et tirage des câbles. — Avant d'effectuer le tirage des *câbles* dans la canalisation, on fait passer dans les caniveaux un train composé d'un mandrin sphérique de 80 mm de diamètre, et de six brosses métalliques cylindriques, d'un diamètre égal ou un peu supérieur à celui du caniveau, reliés l'un à l'autre. Les quatre premières brosses servent au nettoyage et les deux dernières, enduites de vaseline jaune (exempte d'acide), lubrifient le caniveau et facilitent ainsi le glissement du câble.

L'entrepreneur des canalisations, lors des réceptions provisoires, a laissé, comme il a été dit, un fil de fer dans chacun des caniveaux destinés à recevoir actuellement un câble. Ce fil de fer, dont les deux extrémités sont accessibles à deux trous d'homme voisins, sert à amener une corde de chanvre assez forte dans le caniveau : à l'une des extrémités de cette corde on attache le train composé comme il est dit plus haut, et après la sixième brosse on relie l'extrémité d'un câble en acier, s'enroulant sur le tambour d'un treuil, posé au-dessus d'un trou d'homme. C'est ce câble d'acier qui servira à tirer le câble téléphonique.

Dans le cas où le fil de fer n'aurait pas été placé par les entrepreneurs dans le caniveau destiné à recevoir un bout de câble entre deux trous d'homme, il serait nécessaire, pour amener la corde en chanvre qui doit servir à tirer le calibre, les brosses et le câble d'acier, de faire usage d'un jeu de cannes analogue à celui décrit lors de l'essai des conduites. La firme Siemens et Halske fait emploi à cet effet de cannes de 1 m à 1,2 m de longueur et de 30 mm de diamètre, terminées à un bout par un fer plat muni d'un œillet et à l'autre bout par un fer recourbé en crochet. Pour réunir deux cannes l'une à l'autre il faut que celles-ci

fassent entre elles un angle presque droit, de même que pour les séparer. Il n'y a donc pas à craindre que les cannes puissent se séparer dans le caniveau, attendu que le diamètre de celui-ci ne leur permettrait pas de prendre l'angle voulu pour laisser sortir le crochet de l'anneau. Ce système est rapide, il se prête mieux que les cannes à visser à prendre les courbures de la canalisation, et il peut s'employer plus facilement, quelles que soient la forme et les dimensions du trou d'homme.

Dans le cas où la distance comprise entre deux trous d'homme est très grande, et nécessiterait un effort déjà considérable pour pousser sur la longueur entière un jeu de cannes, il est fait usage de deux cannes de construction particulière. L'une des cannes, A, est introduite par un des bouts de la canalisation et poussée par le jeu de cannes ordinaires; l'autre, B, est introduite par l'autre bout et également poussée par un jeu de cannes : les deux parties A et B se rencontrent dans la canalisation, s'emboîtent l'une dans l'autre, les ressorts du bout femelle B maintenant la partie D du bout mâle. Ce système augmente la vitesse du travail, attendu qu'on opère des deux côtés à la fois.

On a donc amené à proximité d'un trou d'homme le treuil sur chariot. Le tambour de ce treuil à double engrenage porte le câble en fils d'acier : à l'aide du système décrit plus haut, le bout de ce câble est tiré dans la canalisation et débouche dans un trou d'homme voisin, à proximité duquel a été installée la bobine du câble sous plomb telle qu'elle a été fournie par l'adjudicataire.

Les bobines de câbles sont fournies par le fabricant de telle manière que ces câbles soient tirés dans la même direction, c'est-à-dire en s'éloignant, par exemple, du bureau central : le bout extérieur de la bobine est muni d'une épissure en fils de fer plats destinée à saisir le câble par le porte-mousqueton relié à l'extrémité du câble de tirage en fils d'acier. Le sens dans lequel doit s'opérer le tirage d'un trou d'homme à l'autre n'est pas indifférent : il faut en effet que les jonctions à faire entre les bouts de câble laissent les conducteurs se suivre dans le même ordre sur toute la longueur de la ligne et qu'il n'y ait pas de croisements à faire entre les fils ou entre les paires de conducteurs dans les joints : de là la nécessité d'indiquer sur chaque bobine le bout extérieur

et la convention admise de tirer les câbles toujours dans la même direction.

Si, par suite de certaines causes dépendant des dispositions des trous d'homme, il devenait nécessaire de tirer le câble dans la direction opposée à celle admise, il faudrait commencer par débobiner le câble et l'enrouler sur une autre bobine, de manière à amener le bout intérieur à l'extérieur, et *vice versa*. Le bout intérieur n'ayant pas été disposé à l'usine pour permettre le tirage, c'est-à-dire ne possédant pas d'épissure, on fait usage d'un dispositif spécial. Cet appareil est formé de deux demi-cylindres en fer, réunis par une vis : ces deux demi-cylindres sont fixés sur le bout du câble et maintenus en place momentanément par un manchon formé de deux parties réunies à l'aide de boulons. Les deux demi-cylindres sont alors fixés au câble par des vis à tête perdue dans le fer, et le manchon est enlevé. Il importe que, pendant le tirage, les vis ne puissent être arrachées et ne demeurent dans la canalisation, ce qui aurait pour effet de déchirer la gaine de plomb du câble.

TÉLÉGRAPHE AUTOMATIQUE IMPRIMANT EN ÉCRITURE CURSIVE, SYSTÈME POLLAK ET VIRAG;

PAR M. PINTER.

Dans une conférence faite à l'hôtel de la Société des Ingénieurs et Architectes à Budapest, j'ai eu l'honneur d'exposer le télégraphe à transmission rapide, système Pollak-Virag. Veuillez me permettre de vous apporter aujourd'hui de nouveaux détails sur les essais en grand tentés depuis, et de vous mettre au courant des progrès considérables réalisés depuis un an par MM. Pollak et Virag avec leur si intéressante invention. Et afin de rendre mes explications aussi claires que possible, qu'il me soit permis de revenir très brièvement sur le système qui a fait l'objet de ma première conférence.

Dans le système de télégraphie à transmission rapide de MM. Pollak et Virag le récepteur diffère essentiellement des récepteurs employés jusqu'à ce jour, tant par son principe que par

sa construction. Les impulsions de courant que l'on transmet automatiquement au moyen d'une bande de papier perforée sont dirigées, au poste récepteur, dans un téléphone, dont la membrane est munie d'un petit miroir concave, de manière extrêmement simple et ingénieuse.

La *fig.* 1 montre la connexion d'un miroir avec la membrane. Le petit miroir est maintenu par un aimant permanent au moyen d'une petite plaquette en fer doux fixée sur lui. L'un des pôles de

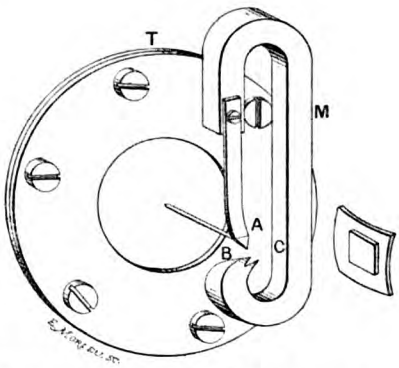


Fig. 1. — Principe du récepteur Pollak et Virag à signaux Morse.

cet aimant permanent se termine par deux pointes, tandis que l'autre pôle porte un ressort mobile, également muni d'une pointe. Reposant sur ces trois pointes, le petit miroir est maintenu magnétiquement, en même temps que la pointe mobile est reliée par une baguette à la membrane du téléphone. Les vibrations de la membrane communiquent au petit miroir une oscillation relative correspondante, les deux pointes fixes constituant l'axe de rotation. Les rayons d'une petite lampe électrique à incandescence sont alors concentrés par ce petit miroir concave sur un papier sensible à la lumière. Les impulsions de courant font mouvoir la membrane du téléphone ainsi que le petit miroir relié à cette membrane; le rayon lumineux réfléchi se déplace également vers le haut ou vers le bas en concordance avec les impulsions du courant. Or si, pendant ce temps, on fait passer le papier sensible dans le sens horizontal, après développement dudit papier sensible nous aurons une ligne en zigzag, reproduisant très exactement les impulsions

de courant transmises. L'alphabet est l'alphabet bien connu de Morse, un trait ou déplacement vers le haut correspondant à un trait, un déplacement vers le bas à un point de l'alphabet Morse, exactement comme dans le siphon recorder. L'un de ces traits est produit par un courant positif et l'autre par un courant négatif. Comme on sait, le téléphone est un appareil très sensible et à action très rapide; par suite, les signes peuvent être transmis avec une vitesse extrêmement élevée, le récepteur suivant leur succession avec la plus grande précision. Mais, pour que ceci puisse se produire avec toute l'exactitude voulue, il faut encore annuler, d'une part, les influences nuisibles de la ligne et éviter, d'autre part, la vibration propre nuisible de la membrane. On sait que la capacité, la résistance et la self-induction de la ligne ont pour conséquence de retarder la marche des impulsions de courant. Au moyen d'une bobine de self-induction de dimensions convenables, montée en dérivation sur la ligne au poste transmetteur, on fait disparaître ces influences nuisibles, car, après chaque impulsion de courant, un contre-courant passe de la bobine d'induction dans la ligne. Par l'utilisation d'un condensateur monté en dérivation sur le téléphone, on élimine d'une manière extrêmement simple la vibration propre de la membrane. A l'aide du récepteur qui vient d'être décrit et du montage combiné desdits condensateur et bobine d'induction, il est possible d'envoyer des télégrammes sur des lignes très longues avec une vitesse supérieure à 70000 mots à l'heure, comme l'ont parfaitement prouvé les essais faits en présence des représentants compétents de l'administration des Télégraphes et d'experts en la matière.

Au mois de septembre 1899, des essais ont été faits sur une ligne téléphonique de 1050 km de longueur établie entre Budapest et Berlin; avec la plus grande facilité on a pu transmettre télégraphiquement près de 80000 mots à l'heure. La tension du courant de la ligne télégraphique était de 12 volts et la résistance de la ligne de 3400 ohms. Encouragés par ces brillants résultats, les inventeurs, pendant un séjour qu'ils ont fait en Amérique au mois de décembre 1899, ont recommencé leurs essais sur la ligne de Chicago à New-York, dont la longueur est déjà bien plus élevée, vu qu'elle comporte 1600 km. Lors de ces expériences, les conditions électriques de la ligne étaient particulièrement défavo-

rables, à tel point que la résistance d'isolement de la ligne, qui aurait dû être de 10000 ohms, n'était que de 5700 ohms par suite de pluies fort abondantes. Les appareils Morse même ne fonctionnaient que très péniblement, et un inducteur téléphonique ne pouvait être entendu que très faiblement à l'autre extrémité de la ligne; quant à une transmission téléphonique sur ce conducteur de cuivre, il ne fallait pas y songer, vu qu'on ne pouvait pas entendre du tout à l'autre extrémité de la ligne un appel fait à très haute voix dans le microphone. Et pourtant les inventeurs ont pu transmettre des télégrammes avec une vitesse atteignant encore 60000 mots par heure.

Tous ces résultats ont démontré la possibilité d'utiliser ce nouveau système de télégraphie, et, dans la suite, MM. Pollak et Virag se sont efforcés d'adapter leurs appareils aux exigences de la pratique, d'une manière simple et efficace.

Ainsi, dans les premiers appareils d'essais et de démonstration, le papier sensible était déplacé hélicoïdalement devant le point lumineux dans un cylindre fermé et, une fois la dépêche terminée, il fallait enlever le papier du cylindre, développer et fixer l'image en chambre noire, ce qui était toujours long et compliqué. Les inventeurs ont alors reconstruit l'appareil récepteur de manière que toutes ces opérations aient lieu automatiquement par un dispositif nouveau représenté *fig.* 2.

Une bande de papier sensible sans fin (P) large de 7 cm, enroulée en quantité suffisante dans une boîte fermée, se déplace de haut en bas, tandis que le point lumineux est amené de gauche à droite indépendamment des oscillations du miroir, de sorte que les lignes sont produites transversalement sur la bande de papier. MM. Pollak et Virag réalisent ce déplacement du point lumineux de la manière suivante :

Une petite lampe à incandescence constituée par un fil incandescent long de 3 à 4 cm sert de source lumineuse. Cette lampe est entourée par une enveloppe cylindrique C, capable de tourner autour de son axe, et présentant sur toute sa longueur une fente étroite sous forme d'hélice. L'image lumineuse d'une petite partie du fil incandescent tombe donc, à travers cette fente, sur le miroir concave : elle est projetée sur le papier sensible comme un point très lumineux. Lorsque le cylindre tourne, ce point lumineux se

déplace de droite à gauche, la fente hélicoïdale découvrant successivement tout le fil incandescent. Le point lumineux réfléchi, c'est-à-dire l'image réelle fournie par le miroir concave, se déplace donc transversalement sur la bande de papier sensible, de gauche

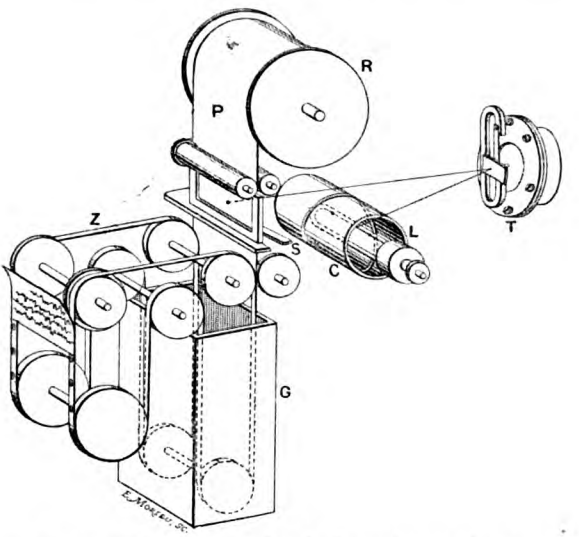


Fig. 2. — Récepteur à bande de papier continue.

à droite, et ce une fois pour chaque tour du cylindre. Pendant que le point lumineux décrit une ligne, le papier sensible sans fin se déplace régulièrement de haut en bas, de sorte qu'au moment où le point lumineux touche de nouveau à gauche, il se trouve descendu d'une ligne. Après avoir été exposé à la lumière, le papier sensible arrive dans l'appareil de développement automatique. Dans celui-ci se trouvent deux rubans Z munis d'une petite broche et guidés sur plusieurs rouleaux de manière à traverser successivement et dans l'ordre les bains G nécessaires au développement photographique. La bande de papier exposée est fixée par deux petits galets aux broches desdits rubans sans fin et traverse les bains avec eux. Une fois sorti du dernier bain, le papier est enlevé des rubans sans fin et quitte l'appareil sous forme d'épreuve terminée. Une paire de ciseaux S, montée entre l'espace où se fait l'exposition et l'appareil de développement,

permet de détacher d'un seul coup la bande impressionnée : la partie de la bande non exposée se trouve arrêtée, et la partie détachée continue son chemin à travers les bains pour sortir tout achevée de l'appareil. Grâce à des dispositifs très simples, l'appareil récepteur est mis en marche par le poste transmetteur en même temps que commence la transmission de la dépêche. L'arrêt est produit au poste récepteur par un employé qui observe constamment au travers d'un verre rouge les signes qui lui sont transmis et qui, au moment où ces signes cessent, presse sur les ciseaux pour détacher la bande exposée et arrête la marche de l'appareil.

Cette construction de l'appareil récepteur comporte sans contredit un perfectionnement important, mais on peut toujours reprocher à ce système de ne constituer qu'un progrès partiel en télégraphie, vu qu'il est possible d'utiliser une ligne télégraphique d'une manière toute nouvelle, il est vrai, mais sans que ce système permette de réduire le personnel et de réaliser avec assez de rapidité et de promptitude la transmission de courtes dépêches, puisqu'il est nécessaire de transcrire d'abord les signes Morse en écriture lisible.

MM. Pollak et Virag se sont donc proposé d'éviter cet inconvénient et d'établir directement les dépêches en écriture courante ordinaire, et leurs efforts ont été couronnés d'un plein succès.

Grâce à une combinaison ingénieuse des impulsions de courant et à une modification intéressante de l'appareil récepteur, les inventeurs ont réussi, non seulement à transmettre des dépêches en signaux Morse, mais même dans n'importe quelle écriture courante. Dans ce but, il faut que le miroir reçoive, par la membrane du téléphone, des oscillations telles que le rayon lumineux décrive non seulement des lignes en zigzag de même hauteur, mais même des lignes dont la réunion reproduise une lettre.

En examinant l'alphabet latin, nous voyons que certaines lettres, par exemple les lettres *m*, *v*, *p* (*fig.* 3) sont formées de simples lignes ascendantes et descendantes de hauteur différente. En décomposant ces lettres en leurs éléments (nous entendons par élément chaque partie de lettre qui peut être écrite avec un unique mouvement ascendant et descendant de la plume et finissant au niveau même où elle a commencé), nous voyons que chaque élé-

ment de lettre peut être dessiné par le rayon lumineux. La lettre *m* se compose, comme on le voit, de *trois*, et les lettres *v*, *p* de *deux* éléments. Pour pouvoir reproduire ces lettres au moyen d'un

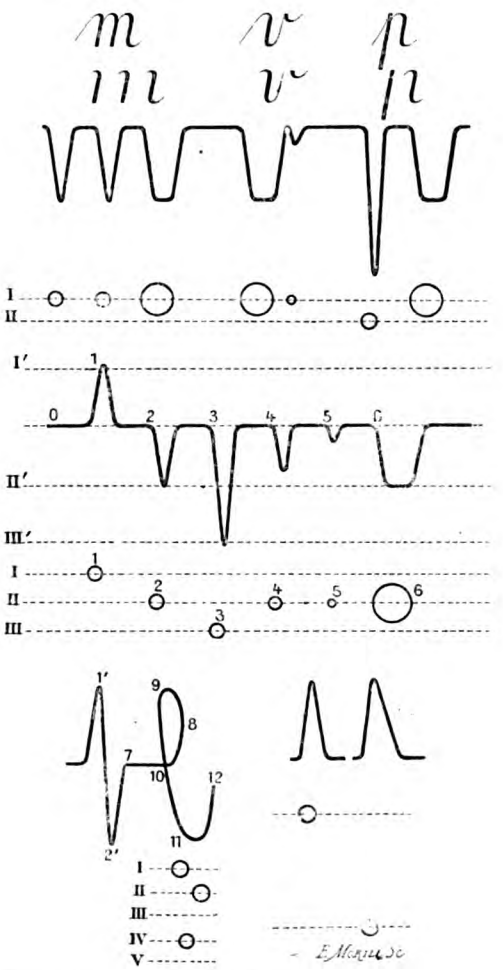


Fig. 3. — Décomposition des signaux pour la reproduction de l'écriture cursive.

rayon lumineux, il faut faire varier le sens, l'intensité et la durée des impulsions de courant transmises, pour obtenir des oscillations correspondantes de caractère différent.

Dans ce but, nous perforons la bande de papier suivant trois rangées I, II, III (*fig.* 3); les combinaisons de courant sont établies de manière que :

I donne un courant négatif d'une certaine tension;
II un courant positif de même tension;
III un courant positif de tension double.

La *fig.* 3 en représente un exemple. La grandeur des trous perforés 1, 2, 3 est choisie de manière qu'à la vitesse choisie pour la bande le contact dure de façon que les impulsions de courant puissent exercer leur plein effet sur le téléphone. Les perforations 4 et 5 sont plus petites, pour que les durées du contact soient plus courtes qu'il n'est nécessaire pour obtenir dans le téléphone un déplacement aussi grand qu'il serait possible de le produire avec un courant permanent. La perforation 6, au contraire, est plus grande, afin que le contact dure plus longtemps qu'il n'est nécessaire à l'établissement du courant. Ces perforations donnent les déplacements 1, 2, 3, 4, 5, 6, représentés par la ligne noire en zigzag (*fig.* 3).

Grâce aux perforations de grandeurs différentes convenablement disposées, nous avons entre les mains un moyen de lancer automatiquement dans la ligne des impulsions de courant différentes, correspondant aux différents éléments des lettres, et de faire mouvoir le miroir de manière que le rayon lumineux reproduise ces éléments des lettres. Ainsi la lettre *m* peut être transmise au moyen de trois impulsions, c'est-à-dire deux perforations (2) et une (6) (*fig.* 3). Pour la lettre *v* il faut deux impulsions de courant de même tension et de durée différente, c'est-à-dire qu'il faut employer une grande perforation et une autre bien plus petite (6, 5). La lettre *p* nécessite deux mêmes perforations (3, 6).

Mais l'alphabet latin se compose, en majeure partie, de lignes courbes fermées qu'il n'est pas possible de transcrire avec le simple point lumineux qui se déplace d'un mouvement vertical de va-et-vient; il faut encore communiquer à ce point lumineux un mouvement dans le sens horizontal. Dans ce but, on décompose les éléments des lettres en deux composantes verticale et horizontale et chaque composante est traduite au moyen d'une impulsion de courant séparée, l'intervalle de temps entre ces impulsions

étant choisi de manière que la résultante de ces composantes transcrite par le miroir du téléphone représente l'élément de lettre en question. Supposons par exemple qu'il s'agisse d'écrire à l'aide du rayon lumineux la lettre *l* (*fig.* 4) dans laquelle on rencontre une courbe fermée, en la supposant décomposée en ses éléments. On commence la lettre à partir du point 7 (*fig.* 3). Au moyen d'un déplacement vers le haut, suivant la perforation (1) seule, on aurait un déplacement comme (1'); mais, dès que le rayon lumineux arrive en 8, la deuxième impulsion de courant se fait sentir; elle fait dévier le rayon lumineux de la direction primitive de son mouvement et le dirige à gauche vers le point 9. Ici finit la première perforation et par suite la première impulsion de courant; par conséquent, le point lumineux se déplace et revient en arrière en 10. Là commence également la troisième perforation suivant 2 qui, seule, donnerait un déplacement dirigé vers le bas comme 2'; le point lumineux se trouve amené en 11. Là finit la deuxième perforation et par suite la deuxième impulsion de courant. Le point lumineux se meut quelque peu vers la droite, forme la courbe inférieure de la lettre *l* jusqu'à ce que la troisième perforation soit arrivée à sa fin; à ce moment cesse la troisième impulsion de courant et le point lumineux atteint 12. La lettre *l* se trouve alors reproduite.

Les mouvements horizontaux du point lumineux sont produits par la membrane d'un second téléphone recevant ses impulsions de courant par une perforation séparée. La disposition est d'ailleurs telle que les mouvements des deux membranes soient transmis à un seul et unique miroir concave.

Ce petit miroir concave est monté de manière que, des trois pointes, une seule soit fixe, les deux autres étant mobiles. Ces trois pointes (*fig.* 4) forment un triangle rectangle A, B, C, dont les sommets A et B sont mobiles, C étant fixe. Si donc on déplace la pointe A perpendiculairement au plan du papier, le miroir oscille autour des points d'appui B, C servant d'axe horizontal, et le rayon lumineux reproduit les déplacements verticaux; mais, si l'on fait mouvoir la pointe B, le miroir oscille autour de l'axe vertical AC et le rayon lumineux dessine alors les déplacements horizontaux. Donc, si les deux points d'appui mobiles se déplacent simultanément, le miroir reproduit la résultante de ces deux com-

posantes. Il est ainsi possible de représenter toutes les lignes courbes dont se composent les lettres. Les deux téléphones mentionnés sont combinés sous forme d'un appareil unique et reliés au petit miroir concave de manière que la membrane de l'un des téléphones T_1 se trouve en connexion avec la pointe mobile (A) et celle du téléphone T_2 avec la pointe mobile (B).

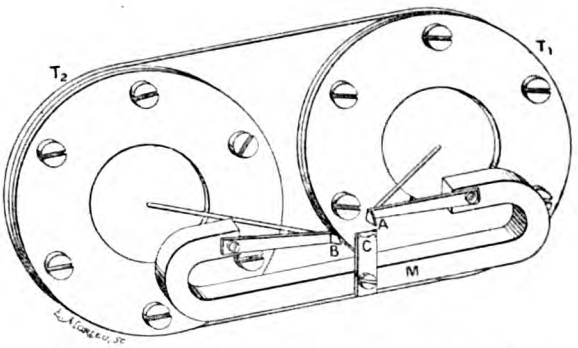


Fig. 4. — Récepteur Pollak et Virag à deux membranes pour écriture cursive.

De cette sorte on est à même de télégraphier toutes les lettres avec une vitesse extraordinaire, en les décomposant en éléments au poste transmetteur et en recomposant ces éléments au poste récepteur.

La *fig.* 5 montre la perforation de différentes lettres et les éléments suivant lesquels ces lettres sont composées dans l'aparcil récepteur. Pour pouvoir transmettre les impulsions de courant correspondantes, on perfore la bande de papier suivant 5 rangées (*fig.* 5). Les rangées I, II, III donnent les impulsions de courant pour le téléphone T_1 qui reproduit les déplacements verticaux, et les rangées IV et V fournissent des courants pour le téléphone T_2 donnant les déplacements horizontaux. Comme source de courant électrique, il suffit de deux batteries avec un nombre modéré d'éléments de piles. La première batterie P_1 fournira un courant positif et négatif, approximativement de même intensité (rangées I, II) et de plus un courant positif (rangée III) d'intensité double. A la seconde batterie P_2 on demande un courant positif plus intense pour des composantes horizontales

allant à gauche et un courant négatif plus faible pour celles qui vont à droite. Ces cinq pôles sont munis de disques métalliques, isolés entre eux et constituant un cylindre pouvant tourner

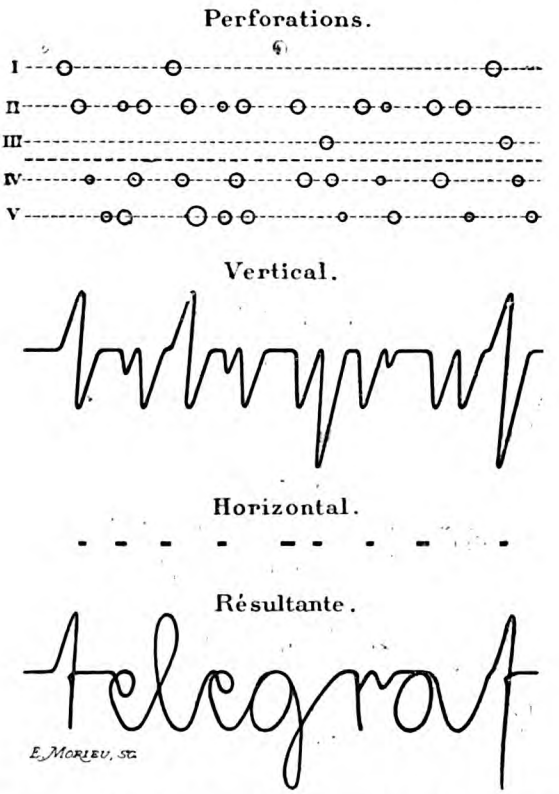


Fig. 5. — Perforation de la bande du transmetteur pour la reproduction du mot *telegraf*. Fac-similé de la reproduction de ce mot en triple environ de sa grandeur réelle.

autour de l'axe; sur ce cylindre passe la bande perforée suivant 5 rangées. Un balai B_1 (*fig.* 6) recouvre les disques fournissant les trois composantes verticales, et un autre balai B_2 recouvre les autres disques donnant les deux composantes horizontales. Chaque balai recueille les impulsions de courant pour le téléphone correspondant et les deux membranes font mouvoir le petit miroir conformément aux résultantes des composantes, et le rayon lumi-

neux, réfléchi par le miroir, se déplace avec rapidité sur le papier sensible, reproduisant ainsi une écriture suffisamment claire et lisible. Pour obtenir une écriture tout à fait parfaite, il est nécessaire de garantir les composantes qui agissent verticalement contre les influences de la capacité et de la self-induction de la ligne. Pour cela, on procède comme dans le système Morse de Pollak et Virag, en branchant, au commencement de la ligne, une bobine de self-induction I_1 en dérivation sur cette ligne. Mais la nature des éléments des lettres nécessite, pour pouvoir mieux les établir, que les composantes horizontales aient une marche un peu lente. Aussi, lorsqu'il s'agit de conducteurs un peu plus longs, on ne corrige pas de circuit, et l'on n'utilise alors qu'une bobine de self-induction I_2 qui agit faiblement. La marche des déplacements verticaux et celle des déplacements horizontaux sont représentées *fig.* 5 au-dessus du mot *telegraf*.

Les oscillations propres des membranes téléphoniques sont évitées au moyen de condensateurs. Il est possible, par l'interposition d'autres condensateurs, de modifier la différence nécessaire du décalage des phases dans les composantes verticales et horizontales. Pour actionner les deux téléphones, il n'est pas nécessaire, comme on serait tenté de le croire, d'employer deux paires de conducteurs ; un conducteur en forme de boucle suffit, comme le montre la *fig.* 6. Le téléphone T_1 est branché sur le conducteur

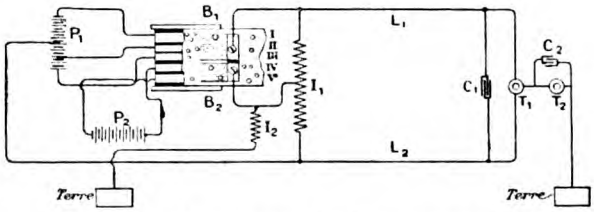


Fig. 6. — Diagramme de connexion électrique d'un poste transmetteur et d'un poste récepteur système Pollak et Virag.

en boucle, et pour le téléphone T_2 ledit conducteur monté en dérivation constitue le fil d'arrivée, la terre servant de fil de retour. P^1 désigne la batterie pour les composantes verticales et I, II, III sont les trois secteurs qui, par connexion avec différents points de la batterie P^1, lancent les impulsions de courant nécessaires

dans le conducteur en boucle L_1 L_2, au moyen du balai $B^{1'}$. Sur ce conducteur est branché le téléphone T^1, et avec lui sont montés en parallèle les condensateurs C_1 ; ce téléphone fait mouvoir le miroir dans le sens vertical et la bobine d'induction I_1 fournit les courants de correction correspondants. La bobine I_1 est reliée en son milieu au balai B_2 qui glisse sur les secteurs IV, V, et fournit le courant de la batterie T_2 pour les composantes horizontales. Ces courants traversent parallèlement le conducteur en boucle et en sens inverse le téléphone T_1, de sorte que celui-ci n'agit pas ; ils arrivent ensuite dans le téléphone T_2 qui déplace le miroir horizontalement et reviennent par la terre à ladite batterie. Des condensateurs C^2 sont montés en parallèle avec le téléphone T_2 ; on peut avantageusement leur adjoindre des résistances qu'on branchera en avant. Une petite bobine d'induction J^2 sert encore, s'il est nécessaire, à corriger le second circuit.

La *fig.* 5 montre la perforation d'un mot *telegraf* et les vibrations exécutées séparément par chaque téléphone. Le mot écrit est la résultante des vibrations verticales et horizontales. La perforation de la bande de papier est obtenue au moyen d'un perforateur établi pour qu'une seule pression produise toujours tout le groupe de perforations dont est composée une lettre.

Ce système de télégraphie n'exige pas de marche synchrone du transmetteur et du récepteur; le fonctionnement de ces appareils est donc rendu très simple et efficace. En accélérant ou en retardant le mouvement du papier sensible ou de la bande perforée, on ne fait que resserrer ou espacer l'écriture. Il est également évident qu'à l'aide d'un distributeur on peut directement lancer le courant dans la ligne, ce qui permet par exemple de faire fonctionner environ 30 appareils sur une seule ligne. Bien qu'avec cette méthode on supprime les bandes perforées, leur emploi est cependant bien plus économique et présente de si grands et de si nombreux avantages, qu'on ne tardera pas à donner toujours la préférence à ce dernier système.

Le télégraphe écrivant, système Pollak et Virag, est non seulement capable de faciliter la transmission d'un nombre considérable de dépêches, mais il est également appelé à diminuer dans une très grande mesure le prix des communications télégraphiques.

Grâce à l'appui moral et matériel que les inventeurs ont trouvé

auprès de S. E. le Ministre du commerce de Hongrie, ils ont été à même d'essayer cette nouvelle invention sur une ligne télégraphique réelle. La Direction générale des Postes et Télégraphes a, en effet, mis à leur disposition, de manière gracieuse et très libérale, quatre lignes téléphoniques allant de Budapest à Pozsony. Ces quatre lignes furent reliées au laboratoire de la Société anonyme réunie d'électricité à Budapest, et le récepteur et le transmetteur furent branchés sur le circuit, de manière que le courant traversât le conducteur en forme de boucle Budapest-Pozsony d'une longueur de 400 km. La résistance qu'offrait ce conducteur était de 2000 ohms. Les dépêches transmises étaient écrites de manière très correcte et lisible et transmises à une vitesse de 60000 mots par heure.

A la demande amicale du Gouvernement français, des essais vont être faits dans quelques semaines entre Paris et Lyon et, pour ma part, je suis pleinement persuadé que les résultats que nous obtiendrons prouveront brillamment tous les avantages du système Pollak-Virag. Il n'est pas douteux qu'avec cette invention nous avons franchi une nouvelle et importante étape de l'histoire du développement de la télégraphie, et que le système Pollak-Virag constitue l'un des succès les plus intéressants obtenus dans ces dernières années dans le domaine des applications du courant faible.

TRANSMETTEUR TÉLÉGRAPHIQUE A ONDES SINUSOÏDALES

De M. le Capitaine SQUIER et de M. CREHORE.

La transmission des signaux avec l'appareil bien connu de Wheatstone, couramment employé en Angleterre, exige une batterie de piles ou toute autre source à force électromotrice constante.

L'onde émise sur la ligne à chaque fermeture du circuit est sensiblement représentée par la ligne brisée (*fig.* 1), laquelle représente une série de points et de traits ainsi que les lettres A et B. Seuls les courants positifs actionnent le récepteur, et dans

ces conditions un point correspond à une onde complète, tandis qu'un trait occupe la place de deux points et de l'espace qui les sépare, il correspond à la durée de deux ondes complètes.

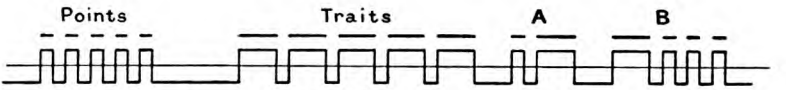


Fig. 1. — Points et traits de l'appareil Wheatstone.

Le point caractéristique à retenir est que les ondes d'émission ont des contours rectangulaires et que la longueur de celles qui produisent un trait sur le récepteur est trois fois plus longue que celles qui produisent un point.

Si l'on met des condensateurs en série avec la ligne, la forme des ondes est modifiée, ainsi que nous l'avons fait remarquer en décrivant un transmetteur pour la télégraphie sous-marine (1).

Dans le transmetteur à ondes sinusoïdales que nous allons décrire, la forme de la courbe de la force électromotrice transmise par la ligne est représentée *fig.* 2; elle produit sur le récepteur Wheatstone le même effet que l'onde primitive (*fig.* 1).

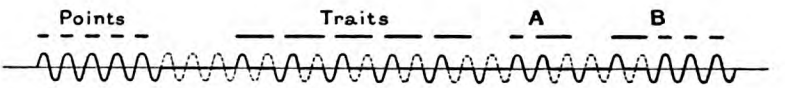


Fig. 2. — Points et traits de l'appareil Squier et Crehore.

Une comparaison entre la forme de ces deux courbes montre cependant plusieurs différences importantes :

Une succession de points est produite dans le transmetteur Wheatstone par une succession régulière de renversements de pôles, tandis que dans le nouveau transmetteur la même succession de points est produite par une émission ininterrompue d'ondes sinusoïdales.

Dans le transmetteur Wheatstone, un trait est produit en maintenant la force électromotrice constante pendant un intervalle de

(1) *A practical transmitter using the sine-waves for cable telegraphy and measurements with alternating currents upon an Atlantic cable* (*Transactions American Institute,* mai 1900).

temps représentant trois fois la durée d'un point (*fig.* 1) et en terminant par une émission négative.

Avec le transmetteur à ondes sinusoïdales, le trait est produit par l'émission d'une première onde positive amorçant le trait, suivie d'une seule onde négative pour le terminer, une période complète séparant ces deux émissions.

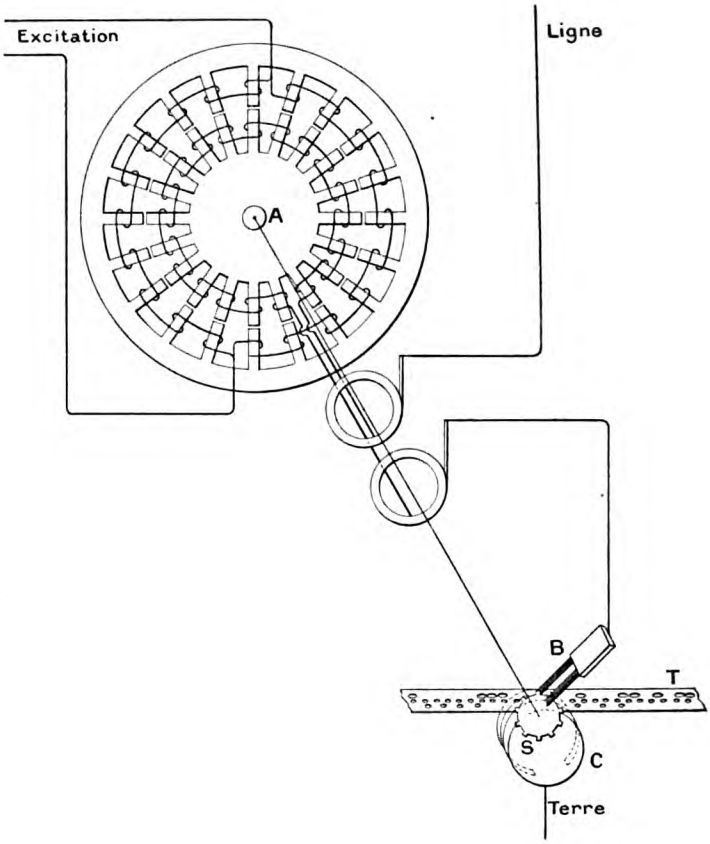


Fig. 3. — Transmetteur à ondes sinusoïdales actionné par un alternateur.

Cette combinaison d'ondes sinusoïdales permettant de reproduire les points et les traits de l'alphabet Morse rend possible l'utilisation pour la télégraphie des courants alternatifs industriels ou ceux produits par des groupes convertisseurs.

L'émission ou la suppression des ondes sinusoïdales est obtenue à condition de maintenir le mouvement de la bande en parfait synchronisme avec le générateur. La *fig.* 3 montre comment l'on peut arriver à transmettre sur la ligne le signal voulu en utilisant

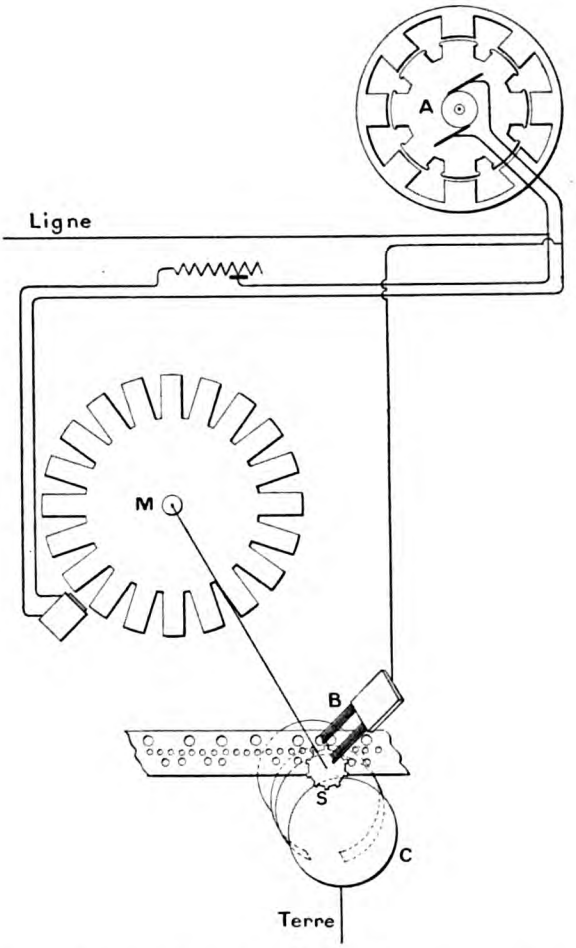


Fig. 4. — Transmetteur à ondes sinusoïdales fonctionnant par moteur synchrone.

un alternateur générateur A dont l'arbre est rendu solidaire de l'axe entraînant la bande perforée au moyen de la roue dentée S.

Il suffit qu'une période complète de la courbe de force électro-

motrice se produise pendant que la bande avance de la distance séparant le centre de deux perforations consécutives.

Un balai B frottant sur la bande peut se mettre en communication avec le cylindre C à travers les perforations de la bande. Le cylindre est relié à la terre et le balai à la source de courant alternatif et de là à la ligne.

En faisant des trous de dimensions convenables sur la bande, il est évident que l'on peut arriver à rendre la durée du contact telle que tout ou partie de la période du courant soit transmise.

La *fig.* 4 montre la production des mêmes signaux au moyen d'un alternateur A actionnant à distance un moteur synchrone M dont l'axe commande le déroulement de la bande de papier.

L'alternateur et le moteur n'ont pas forcément le même nombre de pôles et ils peuvent par conséquent tourner à des vitesses différentes; mais, si la roue dentée S est montée directement sur l'arbre moteur, elle devra comporter une dent par paire de pôles du moteur.

Prenons, par exemple, un alternateur de dix pôles tournant à 2000 tours par minute : si le moteur a vingt pôles, il ne tournera plus qu'à 1000 tours par minute, et dans ce cas le nombre de dents du pignon S devra être de 10 s'il est monté directement sur l'arbre moteur.

Les bandes perforées nécessaires pour transmettre les signaux représentés par les *fig.* 1 et 2 sont indiquées *fig.* 5, sur laquelle

	Point	Trait
Wheatstone	○ ○ ○	○ ○ ○ ○
Ondes sinusoïdales	○ ○	○ ○ ○ ○

Fig. 5. — Perforation des bandes.

on a représenté à la fois les bandes du Wheatstone ordinaire et celles du nouveau transmetteur.

Dans le Wheatstone ordinaire, un point est transmis par deux perforations situées sur une même ligne transversale, tandis qu'un trait nécessite une perforation en haut et une en bas séparées longitudinalement par un léger intervalle.

Avec le nouveau transmetteur, les perforations sont faites sur deux lignes séparées par les trous d'entraînement du papier. Ceux situés d'un même côté sont utilisés pour transmettre les points, ceux de l'autre pour les traits, ce qui rend ces bandes identiques à celles employées sur les lignes sous-marines.

Pour le point, une seule perforation est nécessaire ; sa dimension correspond à l'envoi d'une onde complète ; pour cela, le diamètre du trou est égal à l'intervalle séparant les centres de deux trous d'entraînement consécutifs.

Le commencement du premier trou correspondant à un trait se trouvera sur la même ligne transversale (perpendiculaire à l'axe de la bande) que la fin du trou du point précédent.

Ce premier trou de la perforation correspondant à un trait émet sur la ligne une onde positive, puis la ligne est isolée de la terre pendant une période complète; le deuxième trou envoie alors une onde négative qui termine le trait.

Avec cet appareil, la vitesse de transmission paraît limitée à 100 mots par minute, à cause de la vitesse propre de l'alternateur qui ne peut dépasser 2400 tours par minute avec un inducteur bipolaire.

Dans bien des cas, sur les câbles courts ou sur les longues lignes aériennes, pour lesquels une vitesse supérieure à 100 mots par minute ne peut être obtenue ou n'est pas nécessaire, cet appareil est tout indiqué; il a l'avantage de ne pas nécessiter de batterie de pile.

Dans les villes pourvues d'une station centrale, il est très facile d'installer un moteur électrique couplé directement à l'alternateur. Lorsqu'on ne dispose pas du courant de la ville, il est facile d'utiliser un moteur à eau ou tout autre moteur.

Récemment même, plusieurs de ces générateurs télégraphiques ont été couplés directement sur l'arbre d'un moteur à pétrole lourd de 700 watts, en vue de fonctionner dans l'Alaska, pays dans lequel le climat rigoureux interdit l'emploi de piles, dont les liquides seraient trop souvent congelés.

L'expérience a montré depuis que le prix de l'entretien était bien plus faible avec un groupe électrogène qu'avec des piles, dont la dépense croît avec le nombre d'éléments et, par suite, avec la longueur de la ligne à desservir.

Lorsqu'il est nécessaire de pousser la vitesse de transmission au delà de 100 mots par minute, il suffit de prendre un alternateur ayant plus de deux pôles.

Transmission par moteur synchrone. — Il est quelquefois plus commode, par exemple dans les bureaux télégraphiques à plusieurs directions, d'avoir le générateur de courant alternatif à une certaine distance du mécanisme transmetteur, de façon à en débarrasser les tables de manipulation.

Dans ces conditions, le transmetteur utilise un petit moteur synchrone qui a la propriété, on le sait, de se maintenir en parfait synchronisme avec l'alternateur. Une fois lancé, ce moteur tourne continuellement de façon à être toujours prêt pour la transmission; ce dispositif a, de plus, le grand avantage de supprimer le poids moteur employé avec le transmetteur Wheatstone ordinaire.

On voit de plus qu'un nombre quelconque de transmetteurs pourra être commandé à distance par le même alternateur.

La vitesse de transmission peut être dès lors réglée par le chef du bureau télégraphique en manœuvrant dans le bureau même un rhéostat réglant la vitesse du moteur électrique du groupe convertisseur.

La comparaison entre le transmetteur Wheatstone ordinaire et celui à ondes sinusoïdales montre un avantage en faveur de ce dernier, dans lequel le mécanisme délicat du Wheatstone ordinaire a été éliminé. En effet, le moteur commandant le déroulement de la bande est, dans l'ancien appareil, un poids qu'il faut songer à remonter en temps utile; de plus, le mécanisme délicat du régulateur de vitesse a été remplacé par une simple pièce tournante.

Une autre amélioration importante a été réalisée par la suppression de l'inverseur de batterie, dont le système compliqué de leviers aboutissait à la bande perforée. A la place, un simple balai frottant sur la bande prend contact avec un cylindre de platine à travers les trous.

On a apporté beaucoup de soin à perfectionner le détail des balais et de leur surface de contact, de façon à rendre leur action certaine.

Influence de la forme de la courbe du courant alternatif. — Le récepteur Wheatstone représente le type des appareils télégraphiques dans lesquels un point se distingue d'un trait par sa longueur, à l'inverse des récepteurs chimiques ou du siphon recorder, dans lesquels le point et le trait ont la même longueur, mais ne diffèrent qu'en ce qu'ils correspondent à des courants de sens inverse.

Pour faire produire au récepteur Wheatstone une série de points, il est simplement nécessaire d'envoyer sur la ligne un courant alternatif, ainsi qu'on le voit *fig.* 1 et 2. A mesure que l'onde avance le long de la ligne télégraphique dont la self-induction et la capacité ont une valeur fixe, le courant diminue de valeur. La valeur de cette diminution dépend naturellement de la fréquence de ce même courant, en sorte que plus la fréquence est élevée et moins la transmission est facile.

Or, Fourier a démontré qu'une onde périodique quelconque peut être décomposée en une série d'ondes sinusoïdales ayant chacune une période différente. Une onde de forme analogue à celle de la *fig.* 1 peut être considérée comme formée d'une onde fondamentale et d'un certain nombre d'harmoniques de période plus élevée. Lançons cette onde sur la ligne : les ondes de fréquence élevée vont disparaître peu à peu et l'on conçoit que, lorsqu'on travaille sur une ligne à la vitesse limite de transmission, il n'y a plus que l'onde fondamentale qui entre en jeu.

Si donc l'onde fondamentale pouvait être débarrassée de ses harmoniques, le résultat serait le même sur les longues lignes, sur lesquelles les harmoniques disparaissent, que sur les petites.

On aura donc intérêt à prendre un courant dont la courbe de la force électromotrice se rapproche le plus possible d'une sinusoïde.

Choix de la force électromotrice. — En Angleterre, les tensions de 100 volts sont d'un usage courant avec le transmetteur Wheatstone, aussi bien sur les longues lignes que sur les petites. La limite actuelle à cette tension tient au transmetteur lui-même, dont les contacts de platine ont à rompre le courant lorsqu'il est à son maximum ; il en résulte une étincelle qui détériore l'appareil.

Avec le transmetteur à ondes sinusoïdales, le courant est au con-

traire nul ou très près de zéro au moment où le balai abandonne le contact, à cause de l'action synchrone de l'arbre moteur sur le déplacement de la bande perforée.

La meilleure position de travail avec un balai peut être obtenue en réglant sa position en le déplaçant avec une vis micrométrique jusqu'à ce que toute étincelle disparaisse. Dans ces conditions, on est sûr que le circuit est rompu au moment même où le courant passe par zéro; on peut alors utiliser la force électromotrice que l'on veut, sans danger pour le transmetteur. On emploie couramment une tension de 300 volts efficaces, quoique cette valeur puisse être modifiée suivant la nature de la ligne : il suffit d'agir pour cela sur le rhéostat de champ de l'alternateur.

L'expérience montre que l'on a intérêt à utiliser des tensions un peu fortes lorsque la vitesse de transmission doit être élevée.

On a pu établir par l'expérience une relation permettant de relier entre eux les éléments d'une bonne transmission avec ondes sinusoïdales.

Cette formule peut s'appliquer aux lignes en bronze ou en fer analogues à celles qu'on emploie couramment en Angleterre; elle donnera de bonnes valeurs, à condition que la résistance d'isolement ne soit pas trop faible.

On peut l'écrire

$$crk = 18.10^6.$$

c représente la capacité de la ligne, r la résistance totale et k le nombre de mots transmis par minute.

Cette relation a été établie avec une tension efficace ne dépassant pas 230 volts, mais il est évident que l'équation changera et que la vitesse de transmission se trouvera augmentée avec une valeur plus élevée.

Les principaux avantages des transmetteurs utilisant les ondes sinusoïdales peuvent se résumer aux points suivants :

1° Vitesse de transmission plus grande sur une ligne donnée;

2° Réduction du nombre des relais pour les longues lignes;

3° Réduction à sa plus grande simplicité du mécanisme transmetteur;

4° Conservation d'une vitesse uniforme de transmission, même avec un isolement faible pendant la saison pluvieuse;

5° Adoption d'une vitesse uniforme de transmission, sur tous les circuits partant d'un même bureau ;

6° Emploi de hautes tensions sur les lignes télégraphiques utilisant des appareils automatiques.

(*Traduit de l'anglais* par A. S.)

SUR LES COHÉREURS DÉCOHÉRANTS ET SUR UN ESSAI DE THÉORIE DES COHÉREURS EN GÉNÉRAL;

PAR M. G. FERRIÉ,
Capitaine du Génie.

Pour éviter l'inconvénient des cohéreurs à limailles métalliques qui conservent leur cohérence après qu'on les a soustraits à l'action des ondes électriques, M. Tommasina a étudié un modèle de cohéreur à granules de charbon comprises entre deux électrodes métalliques, dont la cohérence cesse en même temps que sa cause (1).

Nous avons répété les expériences de M. Tommasina et en avons réalisé quelques autres qui sont relatées ci-après. Elles nous ont conduit à proposer, pour expliquer les divers phénomènes constatés, une théorie qui sera exposée à la suite de la description des expériences.

Expériences. — Les expériences faites ont porté sur l'action des ondes hertziennes sur la conductibilité d'un contact imparfait entre deux corps conducteurs plongés dans l'air : charbon-charbon (I), charbon-métal (II) métal-métal (III), métal-liquide-conducteur (IV). Les mêmes expériences ont été faites, les corps conducteurs étant plongés dans du pétrole (V). Quelques-unes ont en outre été répétées dans le vide (VI).

Le dispositif employé était le suivant :

Le contact à étudier était intercalé dans un circuit contenant

(1) M. Popoff à fait également une application réelle d'un cohéreur analogue.

un élément de pile de 1,5 volt, un milliampèremètre (qui a été remplacé parfois par un dimilliampèremètre) et le primaire d'une petite bobine d'induction de poste microtéléphonique. Le secondaire de cette bobine était fermé sur un écouteur téléphonique très sensible.

Ce dispositif était soumis à l'action d'ondes hertziennes produites par une petite étincelle de sonnerie de 50 ohms actionnée par deux éléments. Les résultats observés ont été ensuite vérifiés sous l'action des ondes employées en télégraphie sans fils.

I. Le contact charbon-charbon donne bien le phénomène signalé par Hughes puis par Tommasina, mais sa faible sensibilité est assez variable et présente un maximum pour une conductibilité déterminée. De plus en peut produire la cohérence persistante en le soumettant à l'action d'ondes énergiques.

II. Le contact charbon-métal est plus sensible que le précédent, et les variations de résistance, produites par l'action des ondes, plus intenses. Il y a avantage à ne mettre en circuit que le plus petit nombre possible de points de contact. Les expériences ont été faites avec des contacts uniques et avec des doubles contacts : grain de charbon compris entre deux électrodes métalliques, ou inversement. Le charbon qui a donné les meilleurs résultats est celui fabriqué en grains par la Société *Le Carbone* pour ses microphones; un grain de 1,5 mm environ était maintenu dans un tube de verre entre deux électrodes métalliques.

Les métaux essayés successivement en contact avec le charbon étaient : platine, or, argent, nickel, cuivre, zinc, plomb, étain, fer, acier, laiton, maillechort. Tous ont donné des résultats satisfaisants et supérieurs à ceux obtenus avec le contact charbon-charbon.

Il a été constaté que l'intensité des sons perçus dans le téléphone, sous l'action des ondes hertziennes, dépendait des causes suivantes :

1° Intensité du courant passant au repos dans le contact imparfait;

2° Nature du courant employé et, dans une certaine mesure,

3° Distance du point de production des ondes hertziennes.

1° *Intensité du courant.* — Il est nécessaire que le contact présente au repos une certaine conductibilité, l'intensité du courant qui a paru la plus favorable est inférieure à un milliampèremètre, c'est-à-dire que la résistance de contact doit être comprise entre 1000 et 25000 ohms. Si cette résistance est supérieure, les sons perçus sont de plus en plus faibles à mesure que la résistance diminue et finissent par disparaître complètement pour des résistances variables avec le métal employé. Si la résistance est inférieure, les sons perçus sont encore nets, mais il arrive parfois que la conductibilité cesse brusquement et que l'on ne perçoit plus alors aucun son. Dans le cas d'une conductibilité nulle au repos, le contact peut fonctionner d'une façon irrégulière sous l'action d'ondes énergiques et même acquérir une cohérence persistante.

Lorsqu'on effectue le réglage de la conductibilité du contact, on constate qu'il existe, pour chaque position des conducteurs, une certaine valeur de la conductibilité qui paraît correspondre à un équilibre stable. L'aiguille de l'ampèremètre, après un certain nombre de déplacements dans les deux sens, revient à une certaine position. On peut obtenir, par tâtonnement, une résistance quelconque du contact comprise entre dix ohms et plusieurs milliers d'ohms.

Si l'on intercale dans le circuit deux éléments de pile au lieu d'un seul, le réglage de la conductibilité est plus difficile à établir, il faut d'assez longs tâtonnements, et ce réglage est moins stable. Mais les résultats sont analogues en ce qui concerne l'influence de la conductibilité. Il n'a pas été possible d'obtenir un réglage avec trois éléments.

2° *Nature du métal employé.* — Les résultats obtenus avec les différents métaux sont comparables. Cependant les variations de résistance du contact, et par suite les sons perçus dans le téléphone, sont plus ou moins intenses, toutes choses égales d'ailleurs, suivant les métaux. Le zinc et les alliages de zinc : laiton, maillechort, donnent des sons plus intenses.

Cependant le nickel et le platine donnent des résultats plus réguliers. Viennent ensuite le plomb, l'or, l'argent, le cuivre, l'étain, le fer et l'acier.

Le degré d'oxydation des surfaces métalliques a une notable in-

fluence sur la sensibilité du contact, les meilleurs effets étant obtenus lorsque le métal est bien décapé.

3° *Distance du point de production des ondes.* — L'influence de cette distance sur l'intensité du son produit dans le téléphone est très faible pour certains métaux. Pour le zinc notamment, le son conserve à peu près la même intensité jusqu'à ce qu'il cesse brusquement, lorsqu'on éloigne progressivement l'étincelle excitatrice.

La distance à laquelle il est possible de placer cette étincelle varie avec la conductibilité du contact et avec la nature du métal. La résistance du contact qui donne à ce point de vue les meilleurs résultats paraît être de 20 000 ohms environ pour tous les métaux

Le zinc est le métal qui a permis d'atteindre la plus grande distance : on percevait des sons très nets dans le téléphone, alors que des cohéreurs ordinaires très sensibles, placés à la même distance, n'étaient pas influencés. Mais cette grande sensibilité cesse parfois brusquement, sans raison apparente, et ne peut plus être obtenue que par de très longs tâtonnements. Ce fait peut être attribué à l'altération des surfaces des conducteurs en contact imparfait ou bien à ce que l'un des deux contacts (ce résultat ayant été obtenu avec un cohéreur à double contact) ne remplit plus les conditions voulues à un moment donné.

Des faits analogues ont été constatés avec d'autres métaux, mais à un degré moindre.

Les résultats moyens, les meilleurs, ont été donnés, au point de vue de la sensibilité à distance, par le contact nickel-charbon et le contact platine-charbon.

Si l'on rapproche très près l'étincelle excitatrice, la résistance du contact diminue sensiblement et le son devient plus énergique. Mais, à une certaine limite, la résistance s'abaisse brusquement et la cohérence devient persistante.

III. Les mêmes propriétés ont été constatées pour le contact imparfait de deux métaux, établi de telle sorte que ce contact ait, au repos, une certaine conductibilité comme dans le cas des contacts métal-charbon.

Mais le réglage de cette conductibilité est très long à opérer

sous un voltage de 1,5 volt et, de plus, il est assez rapidement détruit surtout avec certains métaux. Il a néanmoins été possible de conserver le réglage pendant un assez long temps, pour un fragment de mousse de platine comprise entre électrodes de zinc. La sensibilité était très grande et les sons intenses. Ceux-ci étaient perçus dans le téléphone alors que le plus sensible cohéreur ordinaire dont nous disposions n'était pas actionné.

Un cohéreur ordinaire réglable, du système Blondel, à limaille de nickel compris entre électrodes d'argent, a pu également conserver son réglage en cohéreur décohérant, pendant un certain temps. Le peu de durée du réglage du contact des divers métaux n'a permis d'apprécier que d'une façon approchée leur sensibilité relative.

Dès que l'action des ondes devient trop énergique, il se produit une cohérence persistante.

L'emploi d'une faible tension dans le circuit permet de faciliter le réglage et de lui donner une plus grande stabilité.

IV. Le même effet de cohérence décohérente a été constaté au contact d'un fil métallique et d'un liquide conducteur, eau acidulée, contenue dans un tube de verre de faible diamètre, et placé dans les mêmes conditions que précédemment. Toutefois, la sensibilité de ce contact est très notablement inférieure à celle obtenue dans les expériences exposées plus haut. Le maximum de sensibilité étant obtenu lorsque la résistance du contact imparfait était de 20000 ohms environ, et que l'extrémité du fil métallique affleurait à peine le ménisque du liquide. Les résultats obtenus étaient meilleurs avec un fil de cuivre attaqué par l'eau acidulée qu'avec un fil de platine.

V. Les contacts charbon-métal, métal-métal, plongés dans du pétrole, nous ont donné des résultats absolument comparables à ceux obtenus dans l'air, avec un peu moins de sensibilité peut-être. Cependant le contact zinc-mousse de platine nous a donné d'excellents résultats.

VI. Les quelques essais tentés avec des contacts dans le vide n'ont donné aucun résultat. Il est vrai que le réglage de la conduc-

tibilité est rendu très difficile. De plus les effets constatés n'auraient pas été absolument probants, car il a été démontré qu'il reste toujours une couche d'air adhérente aux corps plongés dans un espace où l'on fait le vide.

En résumé, deux corps conducteurs quelconques peuvent être placés en contact imparfait tel que l'action des ondes hertziennes produise des variations faibles de la résistance de ce contact, suivant le rythme de l'interrupteur de l'appareil producteur d'ondes, et la résistance revenant à sa valeur initiale quand le contact est soustrait à l'action des ondes. Tout se passe comme si chaque série d'ondes produisait dans le circuit une résistance négative.

ESSAI DE THÉORIE.

Le fonctionnement des cohéreurs ordinaires et des cohéreurs décohérents, décrits ci-dessus, nous paraît pouvoir être expliqué, en s'appuyant sur les hypothèses suivantes :

Lorsque deux corps conducteurs sont rapprochés de telle sorte qu'une mince couche de diélectrique soit comprise entre les points les plus voisins de leur surface, et que l'on porte ces deux corps à deux potentiels différents, le condensateur de faible capacité ainsi formé *crèvera* lorsque la différence de potentiel atteindra une certaine valeur qui dépend de la nature du diélectrique, de son épaisseur et des corps conducteurs : une étincelle jaillira et des particules des corps conducteurs, entraînées par elle, pourront former un pont entre les deux surfaces et établir entre elles une continuité qui sera détruite par le moindre choc.

Si l'on rapproche encore davantage les corps conducteurs, on peut admettre qu'avant l'établissement du contact absolu entre leurs surfaces, surtout si les surfaces sont presque planes dans le voisinage du point de contact, ils peuvent être placés dans une position telle que le diélectrique soit refoulé en dehors des points des surfaces les plus voisins, produisant ainsi une petite gaine vide entre les deux conducteurs.

Si l'on intercale alors le contact dans un circuit contenant une faible force électromotrice, il se produira, entre les deux conduc-

teurs, une effluve remplissant le chenal vide, et un instrument de mesure indiquera une certaine conductibilité du circuit.

Si l'on augmente progressivement la force électromotrice, l'effluve renforcée agrandira le chenal jusqu'à ce que l'élasticité du diélectrique et son adhérence aux corps conducteurs s'opposent à cet élargissement : à ce moment, si la différence de potentiel continue à augmenter, une étincelle disruptive se produira comme dans le cas ordinaire.

On peut aussi former ce chenal de la manière suivante : les deux surfaces ayant été placées de manière que la couche de diélectrique comprise entre elles soit très mince et continue, on provoque par une charge convenable la production de l'étincelle et l'établissement d'un pont conducteur entre les deux, puis on annule la différence de potentiel entre les deux corps et l'on provoque la rupture du pont. Le diélectrique pourra ne pas réoccuper l'espace occupé auparavant par celui-ci, et le chenal se trouvera ainsi formé.

Ces divers faits sont plus ou moins nets suivant la nature du diélectrique et des corps conducteurs.

L'explication du fonctionnement des divers détecteurs d'ondes étudiés plus haut devient alors simple.

1° Dans le cas de cohéreurs ordinaires à contact unique, par exemple, la mince couche de diélectrique comprise entre les deux conducteurs est continue et l'appareil fonctionne comme un condensateur, et ce que M. Blondel a appelé la *tension critique de cohérence* est la différence de potentiel que peuvent supporter les armatures du condensateur sans *crever*, et l'on conçoit l'influence de la pression des corps en contact imparfait, car la couche de diélectrique sera d'autant plus mince que la pression sera plus forte.

Lorsqu'on intercale l'appareil dans un circuit contenant une force électromotrice, inférieure à cette tension critique, et qu'on le soumet à l'action d'ondes hertziennes, celles-ci auront pour effet d'établir entre les armatures une certaine différence de potentiel qui pourra s'ajouter à celle existant normalement et provoquer alors la décharge du condensateur.

On pourrait croire que la valeur de cette tension critique n'a pas d'importance et qu'il suffit que la force électromotrice du circuit

soit légèrement inférieure à l'autre, l'action des ondes hertziennes fournissant le complément pour provoquer la décharge. Mais il est facile de se rendre compte qu'il n'en est pas ainsi [1] et qu'il n'est pas possible d'obtenir un fonctionnement régulier lorsque la différence de potentiel établie normalement, par le circuit, entre les armatures du condensateur est assez élevée et peu inférieure à la tension critique. On est obligé, dans ce cas, pour avoir un bon fonctionnement, de placer dans le circuit une force électromotrice notablement inférieure à la tension critique, et la sensibilité de l'instrument s'en trouve fortement diminuée. Il y a donc avantage à employer des cohéreurs à basse tension critique.

On constate fréquemment que certains cohéreurs à limaille métallique, malgré la suppression des ondes parasites et l'énergie des chocs, ne se décohèrent pas toujours au premier choc et que, lorsqu'ils se décohèrent au premier choc, leur sensibilité est, aussitôt après, notablement plus grande que quelques instants plus tard. On peut expliquer le premier fait en admettant que les petits condensateurs formés par les grains de limaille n'ont pas eu tout le temps de se décharger avant le choc et se déchargent après celui-ci, et le second en admettant que la décharge des mêmes petits condensateurs n'a pas été complète avant le choc et qu'ils conservent, pendant un certain temps après, une charge qui augmente la sensibilité de l'instrument puisqu'elle diminue la différence de potentiel à créer par les ondes pour provoquer l'étincelle.

2° Dans le cas des cohéreurs décohérents, on constate qu'en fonctionnement régulier, les variations de résistance du contact imparfait suivent le rythme de l'interrupteur du producteur d'ondes. On peut admettre que chaque train d'ondes agit simultanément sur l'effluve dont il a été parlé plus haut et que celle-ci s'élargit lorsque la différence de potentiel entre les conducteurs est augmentée par l'action du train d'ondes, et revient à son état normal, grâce à l'élasticité du diélectrique, lorsque cette action cesse. Chacun de ces élargissements est accompagné d'une diminution de résistance à laquelle correspond une augmentation d'intensité du courant, qui reprend sa valeur normale en même temps que l'effluve revient à l'état primitif.

---

[1] Blondel et Dobkewitch, *Éclairage électrique*, t. XXIII, 5 mai 1900.

Les variations constatées dans le fonctionnement de ces instruments proviendraient alors de variations de l'élasticité et de l'adhérence du diélectrique pendant le fonctionnement. Les différences de sensibilité suivant les corps employés proviendraient aussi des mêmes causes.

Note. — Les hypothèses émises plus haut permettent aussi d'expliquer l'expérience ci-après, indépendante de l'action d'ondes hertziennes :

Si l'on remplace, dans le dispositif ayant servi à faire les expériences décrites dans cette étude, le cohéreur à deux contacts par un cohéreur à contact unique formé d'un morceau de crayon de lampe à arc de 1 cm environ de diamètre dont la section a été polie, et d'un petit cylindre d'argent de 1,5 mm environ de diamètre fixé au-dessus du charbon et mobile dans le sens de la hauteur au moyen d'une vis micrométrique à très large tête, et que l'on rapproche peu à peu les deux corps, on constate les faits suivants :

Il est possible, par tâtonnements, de donner à la résistance du contact une valeur quelconque. Lorsque cette résistance atteint une certaine valeur, il se produit une succession régulière et automatique de variations d'intensité du courant qui se traduisent par un son musical continu dans le téléphone. Pendant toute la production de ces interruptions régulières, l'aiguille du milliampèremètre paraît à peu près immobile et marque une intensité constante et égale à 0,05 ampère.

Le même effet a pu être produit en remplaçant l'argent par du zinc, du cuivre rouge, de l'acier, de l'or et du platine. Le son produit est variable avec le métal employé et la position d'équilibre que prend l'aiguille de l'ampèremètre [1]. Avec un mince fil de platine, le son produit était le plus aigu, environ l'octave du *la* normal. L'intensité dans ce dernier cas était de 0,15 ampère seulement.

Nous avons essayé de réaliser le même phénomène au contact de deux métaux, nous y sommes parvenu avec un fil de platine

[1] Pour un même métal on peut obtenir plusieurs sons différents correspondant à des valeurs différentes de l'intensité.

sur une lame d'argent, mais la durée du son musical était très courte, une seconde à peine, alors que, dans les expériences précédentes, le son pouvait durer aussi longtemps qu'on ne touchait pas au dispositif.

On peut parfois faciliter l'établissement des interruptions automatiques en frottant un corps léger sur la planchette support de l'appareil, qui se comporte d'ailleurs comme un microphone extrêmement sonore.

Ces expériences peuvent être expliquées de la manière suivante :

Lorsqu'on parvient à créer une gaine vide entre les deux conducteurs, l'effluve qui s'établit aussitôt a pour effet de diminuer la différence de potentiel entre les conducteurs, par suite de la diminution de résistance et en outre par la self-induction du circuit. Cette effluve tend donc à diminuer et, par suite, le diélectrique en vertu de son élasticité tend à resserrer la gaine vide dans laquelle elle se produit. Mais alors, l'effluve diminuant, la différence de potentiel augmente, par suite de l'augmentation de résistance et de la self-induction [1].

L'effluve augmente donc de nouveau et ainsi de suite. Il se produira donc une suite ininterrompue de pulsations régulières du diélectrique auxquelles correspondra une variation sinusoïdale de l'intensité du courant, qui se traduira par un son musical du téléphone.

La même expérience peut être répétée en supprimant la bobine d'induction et en intercalant directement le téléphone dans le circuit du contact imparfait.

---

[1] Les courants d'induction engendrés par les vibrations de la plaque du téléphone ont une influence notable. En effet, si l'on arrête ces vibrations en appuyant sur la plaque, on voit l'aiguille du galvanomètre quitter sa position et parfois même retomber à l'une de ses positions extrêmes. Le phénomène se produit en outre beaucoup plus facilement lorsqu'on met deux écouteurs en série au lieu d'un seul aux bornes du secondaire. Si l'on place un troisième téléphone en dérivation aux bornes du secondaire, il se produit des battements dans le son perçu et l'aiguille de l'ampèremètre ne se maintient plus fixe, elle oscille sensiblement à chaque battement.

EXPÉRIENCES SUR LES MOUVEMENTS DE LA LIMAILLE DANS LES COHÉREURS;

PAR M. JULES SEMENOV.

Le tube à limaille est-il radioconducteur ou cohéreur?

Cette question est d'un grand intérêt au point de vue théorique aussi bien qu'au point de vue pratique.

En effet, si, comme le croit M. Branly, les propriétés du tube à limaille étaient dues à la radioconductibilité, cette dernière pourrait se manifester également dans d'autres substances non conductrices qu'elle rendrait de la sorte conductrices.

M. Lodge a émis une autre hypothèse, celle du cohéreur, et M. Arons a vu à travers le microscope le pont s'établir dans la limaille sous l'influence des vibrations hertziennes, ce qui est un argument en faveur de l'hypothèse de M. Lodge.

Mais on peut objecter à M. Arons que le pont se forme apres le passage du courant sous l'influence des forces du champ magnétique créé par le courant même. M. Arons aurait donc pris l'effet pour la cause.

J'ai entrepris l'hiver passé, dans le laboratoire de recherches de M. Lippmann à la Sorbonne, une série d'expériences pour constater si la formation du pont précède ou suit le passage du courant à travers la limaille.

Dans le premier cas, le tube à limaille serait cohéreur; dans le second, il serait radioconducteur.

A cet effet, j'ai placé sur un support isolant un réseau en fil d'argent de 0,05 mm de diamètre, tendu sur un cadre en cuivre. Le côté intérieur du cadre était de 3 cm et il contenait 55 fils.

Parallèlement au plan du réseau j'ai disposé une plaque de cuivre susceptible de se déplacer parallèlement à elle-même et au réseau à l'aide d'une vis soudée à la plaque et passée à travers un autre support isolant. Cette dernière était reliée au pôle d'un élément Daniell, tandis que le réseau se trouvait en communication avec l'autre pôle. Le circuit comprenait un galvanomètre Déprez-D'Arsonval. Entre le réseau et la plaque de cuivre j'insérais une lame très mince de mica, au milieu de laquelle j'ai percé un trou de 0,5 mm de diamètre, que je remplis de limaille d'argent

et de nickel. La limaille se trouvait en contact, d'un côté, avec un fil du réseau, de l'autre côté avec la plaque, et fermait ainsi le circuit. Comme le diamètre du trou percé dans la lame de mica était de beaucoup supérieur à celui des fils du réseau, la limaille pouvait facilement se déverser au dehors.

Voici quelle était la disposition de mes expériences : Le plan du réseau était perpendiculaire à la ligne de propagation des ondulations; celles-ci, en passant par le réseau, traversaient la lame de mica et atteignaient en dernier lieu la plaque de cuivre. En conséquence, dans le trou rempli de limaille les ondulations devaient se propager dans le sens du courant.

Après avoir inséré la lame entre le réseau et la plaque et s'être bien assuré que le trou était rempli de limaille, je faisais fonctionner la bobine, et je surveillais le galvanomètre.

Les faits que j'ai pu observer au moyen de ce procédé expérimental ont varié en rapport avec les deux éventualités suivantes :

1° La limaille ne laissait pas passer le courant avant que la bobine ait commencé à fonctionner.

2° Lorsque la limaille était fortement tassée dans le trou, le courant passait avant que la bobine ait commencé à fonctionner.

Dans le premier cas, on constatait de deux choses l'une : ou le courant commençait à passer immédiatement sous l'influence de l'étincelle, ou bien le galvanomètre ne recevait qu'une faible impulsion et revenait ensuite à zéro. Voici ce qui devait se passer : sous l'influence de l'étincelle, la limaille formait le pont et fermait ainsi le circuit; mais, quelquefois, en formant le pont, les grains de limaille perdaient l'équilibre et se déversaient au dehors. En cette dernière occurrence, le galvanomètre, après avoir reçu une faible impulsion, revenait à zéro.

J'aborde maintenant le cas où le courant passait à travers la limaille avant que la bobine ait commencé à fonctionner, le galvanomètre indiquant une certaine déviation.

Parfois l'étincelle ne provoquait aucune modification, mais d'autres fois le galvanomètre, après avoir reçu une petite impulsion vers zéro, revenait à sa position primitive de déviation, ou bien le galvanomètre, après un instant d'indécision, revenait à zéro.

Analysons ce qui se passait dans la limaille dans ces trois der-

niers cas. Dans le premier cas, la limaille était évidemment trop serrée pour que l'étincelle puisse produire un effet quelconque : donc rien ne changeait; dans le deuxième cas, sous l'influence de l'étincelle, les grains de limaille changeaient d'orientation et formaient le pont. Et c'est précisément pendant ce très court instant de changement d'orientation des grains que le courant était interrompu pour se rétablir de nouveau par la formation du pont. Mais lorsque, pendant le changement d'orientation, les grains perdaient l'équilibre et tombaient du trou, le courant se trouvait complètement interrompu. Tel est le troisième cas de cette deuxième série de faits. Le deuxième cas de cette même série mérite plus d'attention que les autres, parce qu'il est le plus probant de tous.

En effet, le changement d'orientation des grains précède ici d'une façon évidente le passage du courant. Donc, ce n'est pas le courant, mais le champ magnétique créé par le passage des ondes électriques, qui est la cause de la formation du pont, ce qui prouve par analogie que le tube à limaille n'est pas un radioconducteur, mais un cohéreur.

C'est ainsi que je suis arrivé à penser que le nom de *radioconducteur* attribué par M. Branly à son appareil ne répond pas au mécanisme intime des phénomènes que ce savant a observés.

CINQUIÈME SECTION.

LES LIGNES DE FORCE ET LES SURFACES ÉQUIPOTENTIELLES VÉGÉTALES;

PAR M. G.-M. STANOIÉVITCH,
Professeur à la Faculté des Sciences de Belgrade.

La notion des lignes de force et des surfaces équipotentielles, résultantes de forces centrales, a rendu de très grands services en électricité et en magnétisme. On sait, en effet, combien il est facile d'expliquer et de saisir certains phénomènes électriques et magnétiques, d'ailleurs très compliqués, en poursuivant la marche de ces éléments. Un électricien, dans la construction d'une machine dynamo-électrique, n'est guidé que par la distribution des lignes de force dans le champ électromagnétique. Nous allons essayer de montrer que la notion des lignes de force et des surfaces équipotentielles peut être appliquée non seulement à l'étude des phénomènes électromagnétiques, mais aussi à l'étude de la nature organique et surtout du monde végétal.

On sait que nous trouvons le cas le plus simple de lignes de force et des surfaces équipotentielles dans le champ de gravitation de notre Terre. Les lignes de force sont des *verticales* et les surfaces sont par conséquent les *horizontales,* c'est-à-dire les *surfaces de niveau*, par quel nom on désigne très souvent les surfaces équipotentielles. Nous ajouterons seulement que le champ de gravitation de notre Terre, pour une certaine partie de sa surface, est homogène, étant composé des lignes de force et des surfaces équipotentielles sensiblement parallèles.

Certains cas beaucoup plus intéressants et plus compliqués au point de vue des parcours de lignes de force et des surfaces équipotentielles se présentent dans un champ électrique ou magnétique.

Pour que leur ressemblance avec des cas analogues dans le monde végétal soit plus évidente nous nous arrêterons en passant à quelques-uns de ces champs électriques ou magnétiques.

Et tout d'abord le champ d'une masse électrique ou magnétique isolée est tout à fait identique au champ de gravitation considéré plus haut. Cela veut dire que le champ électrique (ou magnétique) d'une masse isolée est traversé par des droites partant de la masse dans toutes les directions; les surfaces équipotentielles sont ici aussi des sphères concentriques et cela sans distinction, que la masse considérée soit chargée d'électricité positive ou négative ou qu'elle contienne du magnétisme sud ou nord.

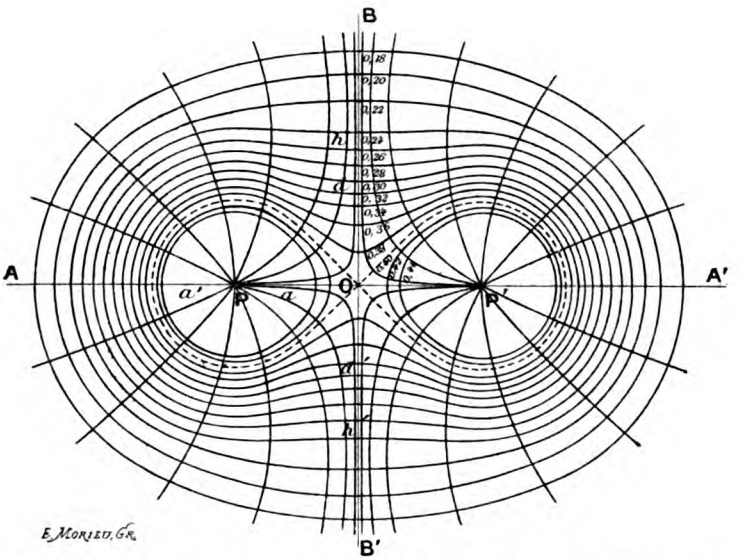


Fig. 1. — Champs théoriques de deux pôles magnétiques ou électriques de même nom et de mêmes intensités.

L'aspect du champ électrique (ou magnétique) de deux pôles dépendra des noms de ces pôles ainsi que de leurs intensités respectives. Nous nous arrêterons à quelques cas des plus intéressants que nous retrouverons d'ailleurs reproduits dans les champs correspondants cellulaires.

Dans la *fig.* 1 nous avons le parcours de lignes de force et des surfaces équipotentielles dans un champ formé par deux pôles

électriques (ou magnétiques) de mêmes noms et de mêmes intensités.

Supposons qu'un des deux pôles (restés toujours de mêmes noms) devient plus faible. Le champ n'est plus traversé symétriquement par des lignes de force et les surfaces équipotentielles. La ligne moyenne BB′ (*fig.* 1) n'est plus droite; elle est maintenant courbée et rapprochée du pôle plus faible. L'aspect de ce champ est représenté d'après Maxwell par la *fig.* 2.

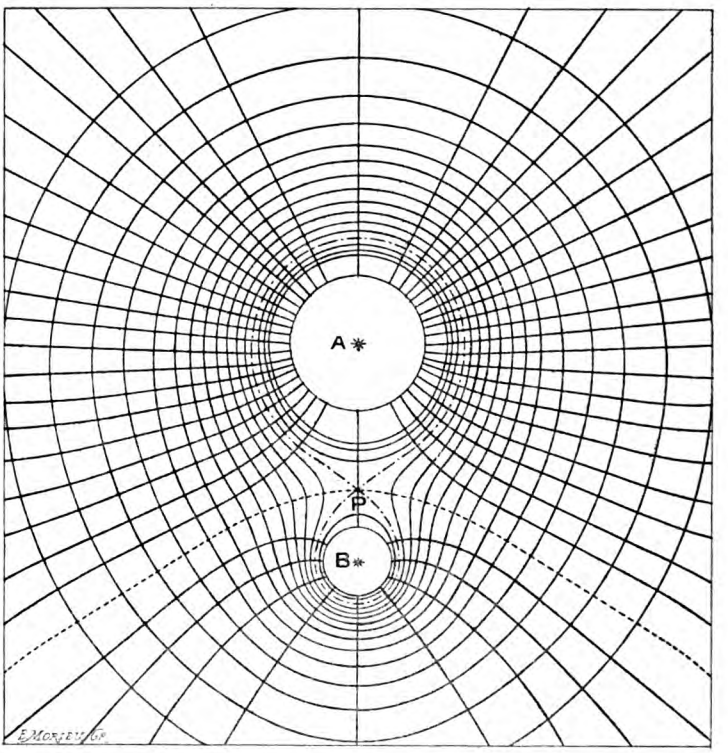


Fig. 2. — Diagramme théorique d'un champ électrique.

Si le pôle considéré diminue davantage, les lignes de l'autre pôle deviennent plus importantes, de sorte que, quand ce pôle devient nul, nous n'avons qu'un seul pôle avec ses sphères concentriques et les lignes de force les traversant radialement.

Le pôle considéré peut devenir plus petit que nul; il devient

de nom contraire (négatif si le premier pôle était positif). Dans ce cas le champ devient tout différent. Les lignes de force sortent d'un pôle et aboutissent dans l'autre. Les surfaces équipotentielles restent fermées autour de chaque pôle et très serrées dans l'espace compris entre les deux pôles (*fig.* 3).

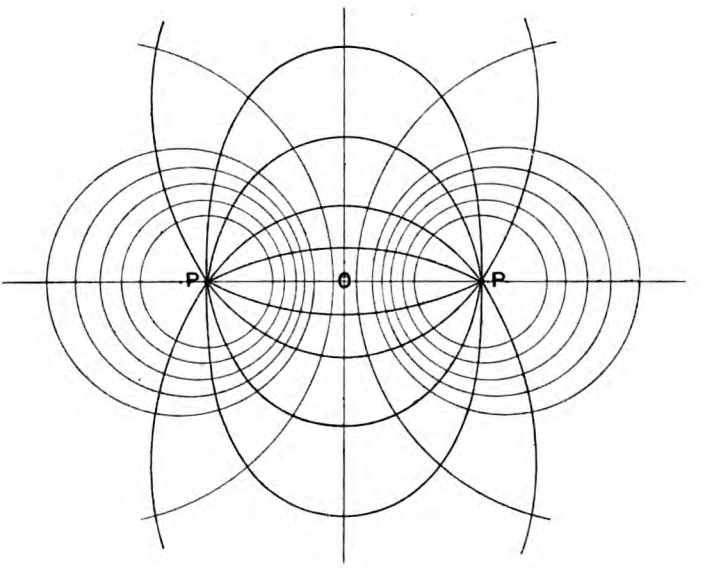


Fig. 3. — Champ de deux pôles de noms contraires.

Considérons maintenant un champ électrique (ou magnétique) homogène, caractérisé par des lignes de force (et des surfaces équipotentielles) parallèles. Introduisons dans ce champ un pôle correspondant (électrique ou magnétique); celui-ci, par ses propres lignes et surfaces, troublera la disposition des lignes et des surfaces du champ homogène. L'aspect du champ troublé sera plus ou moins différent; voici quelques cas des plus importants :

Dans un champ homogène on introduit un pôle A (*fig.* 4) (d'après Maxwell). Les lignes concentriques autour du pôle A ne sont autre chose que les traces des surfaces équipotentielles de ce même pôle. Ces lignes ont la tendance de donner aux lignes du champ homogène la même direction et réussissent à en rouler

quelques-unes autour d'elles. Très loin de ce pôle, les lignes du champ restent parallèles, c'est-à-dire le champ reste homogène.

Deux pôles de même nom et de mêmes intensités placés dans un champ homogène produiront des perturbations représentées, d'après Maxwell, dans notre *fig.* 5.

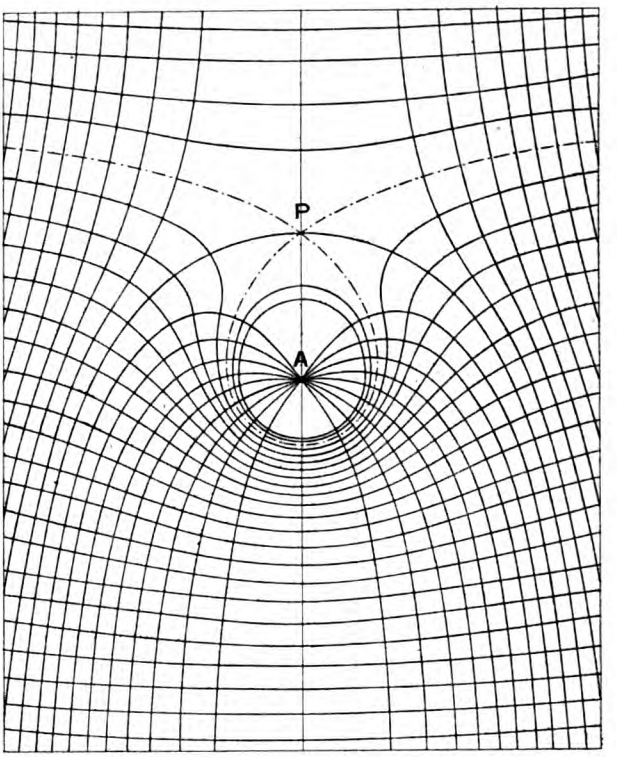


Fig. 4. — Perturbation d'un champ homogène par un pôle électrique.

Enfin un champ homogène, troublé par deux pôles de même intensité mais de noms contraires, est représenté, d'après Lehman, par la *fig.* 6.

On sait que chaque courant électrique, sur son passage, crée un champ magnétique. Si le courant est rectiligne, les surfaces équipotentielles sont des cylindres concentriques autour de ce courant (*fig.* 7). Sur la coupe transversale nous ne voyons que les cercles concentriques, semblables à ceux d'un champ d'un

pôle (électrique ou magnétique) isolé. Une coupe longitudinale

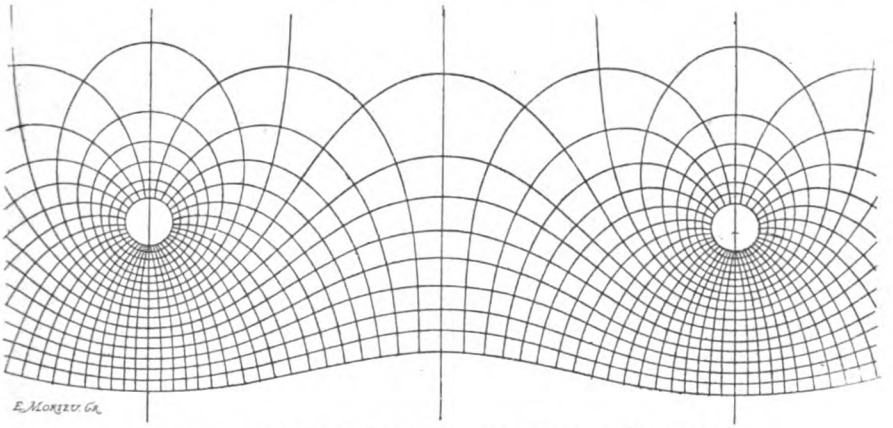


Fig. 5. — Deux pôles électriques dans un champ homogène.

nous donnera des lignes parallèles, si le champ reste homogène et non troublé.

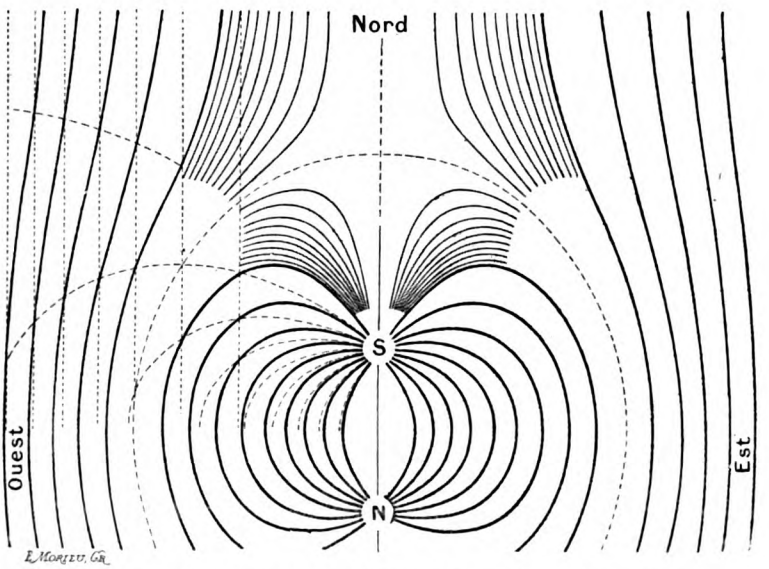


Fig. 6. — Deux pôles magnétiques dans un champ homogène.

Si nous avons deux courants rectilignes de même intensité et de

même sens, parallèles et assez rapprochés pour qu'ils puissent agir l'un sur l'autre, une coupe transversale nous montrera un champ semblable à celui de deux pôles de même nom, représenté par la *fig.* 1. Notre *fig.* 8 nous montre l'aspect complet de ce champ composé de surfaces cylindriques ainsi que de celles en forme de lemniscates.

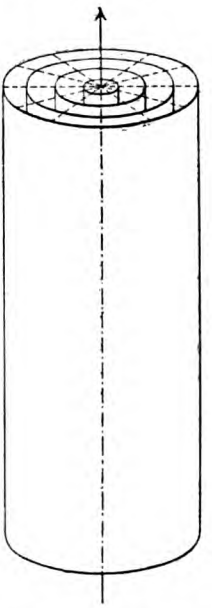


Fig. 7. — Champ d'un courant rectiligne.

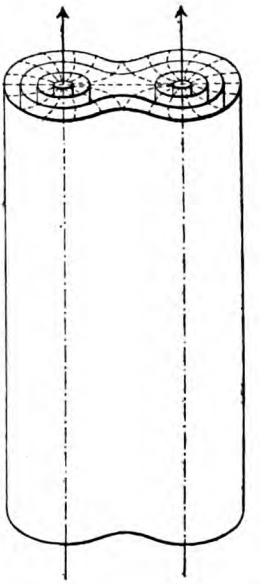


Fig. 8. — Champ de deux courants parallèles.

Nous trouvons cette même disposition dans le cas de bifurcation d'un courant. Une coupe par le point de bifurcation nous donne des cercles concentriques. Une coupe par les deux branches, et non loin du point de bifurcation, c'est-à-dire à l'endroit où les deux courants agissent l'un sur l'autre, nous donnera un champ des lemniscates. Tout à fait loin du point de bifurcation, où les deux courants sont trop loin pour pouvoir s'influencer, nous voyons deux champs composés de cercles concentriques (*fig.* 9).

Les perturbations produites par des courants électriques dans des champs homogènes sont identiques à celles produites par des pôles (magnétiques ou électriques) dans des champs corres-

pondants. Si, par exemple, un courant électrique passe par un champ homogène, nous aurons dans le plan perpendiculaire au courant un champ de perturbation analogue à celui représenté par

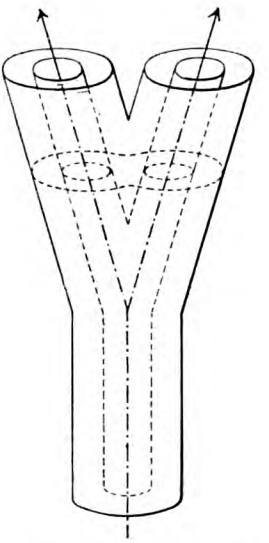


Fig. 9. — Champ d'un courant bifurqué.

la *fig.* 4. Deux courants parallèles de même sens, dans un champ homogène, nous donneraient un champ analogue à celui de la *fig.* 5, etc.

Nous arrivons maintenant à parler des lignes de force et des surfaces équipotentielles observées dans certains tissus cellulaires et surtout dans les tissus de plantes. Notre charge de parler de ces phénomènes théoriques dans les tissus des plantes est facilitée par ce fait, que ces *lignes de force* et ces *surfaces équipotentielles* ne sont autre chose que les stries et les lignes que chacun a si souvent observées sur n'importe quelle planche de sapin ou de chêne. Nous allons seulement montrer que ces cellules, visibles par leur différenciation de l'autre tissu (ainsi que toutes les autres cellules non différenciées), suivent les lois des forces centrales et présentent toutes les détails que nous venons de voir dans un champ magnétique ou électrique.

On sait que les lignes de force magnétiques peuvent être visibles à l'aide des limailles de fer, mais que les surfaces équipotentielles magnétiques ne sont pas visibles directement. De même, il y a des plantes où l'on voit seulement des lignes de force ainsi qu'il y en a d'autres qui ne présentent que leurs surfaces équipotentielles. Nous verrons pourtant qu'il y a des plantes qui nous montrent en même temps leurs lignes de force et leurs surfaces équipotentielles.

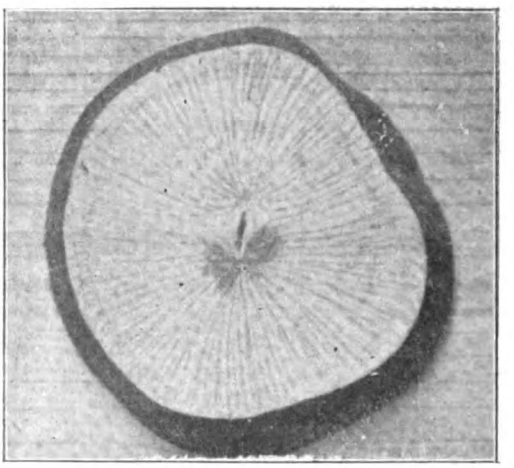


Fig. 10. — Coupe d'un radis. Lignes de force cellulaires de deux pôles de même nom et d'inégales intensités.

Il nous semble que c'est le seul cas où nous pouvons observer directement ces phénomènes reproduits et dessinés par la nature elle-même.

On voit le mieux les lignes de force cellulaires en coupant un radis ordinaire normalement à son axe. Les lignes qui, partant du centre, vont radialement dans toutes les directions, nous montrent que nous avons ici une sorte d'un pôle ou d'un seul courant. En faisant une coupe normalement à l'axe d'un bois de sapin, nous obtenons des cercles concentriques, les années, qui sont des traces des surfaces équipotentielles cylindriques analogues à celles autour d'un courant rectiligne. Une coupe semblable dans un bois

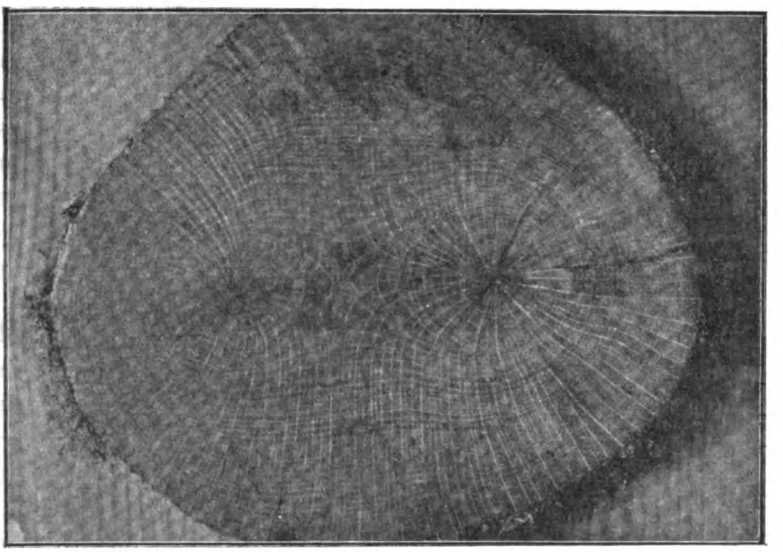


Fig. 11. — Section d'une branche de chêne. Lignes de force et surfaces équipotentielles cellulaires. Deux pôles de même nom et sensiblement de même intensité.

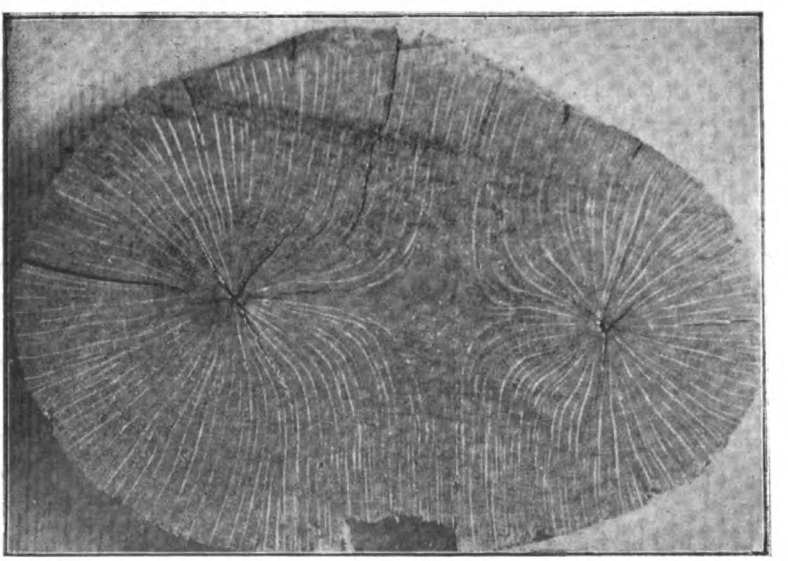


Fig. 12. — Section d'une branche de chêne.
Lignes de force cellulaires de deux pôles de même sens.

de chêne nous présente en même temps et les lignes de force et les surfaces équipotentielles de cette plante.

Nous passons tout de suite aux cas plus compliqués. Notre *fig.* 10 nous présente une coupe d'un radis, normalement à l'axe. Nous y voyons quelque chose comme deux pôles (ou courants) avec leurs lignes de force. En même temps nous remarquons que ces deux pôles sont de même nom et qu'ils ne sont pas de mêmes intensités. L'ensemble des lignes de force de cette coupe nous rappelle l'image théorique, reproduite dans la *fig.* 2, d'un champ de deux pôles de même nom et d'intensités différentes.

Dans la *fig.* 11 nous voyons encore un champ à deux pôles de même nom dont les intensités sont sensiblement égales. C'est une photographie d'une coupe d'un bois de chêne, dans laquelle les lignes de force sont surtout bien visibles. Nous remarquons en même temps quelques fentes qui suivent aussi la direction des lignes de force.

Notre *fig.* 12 nous présente le cas le plus complet de ce genre. Nous voyons ici les lignes de force et des surfaces équipotentielles cellulaires en même temps. Il est à peine nécessaire de remarquer que nous avons ici une reproduction presque complète du dessin théorique de la *fig.* 1. Notre *fig.* 12, qui est faite d'après une photographie, nous présente un champ cellulaire complet, formé de deux pôles de même nom et presque de même intensité [1].

Les lignes de force et les surfaces équipotentielles cellulaires sont reproduites ici tout à fait d'après les lois des forces centrales, par la nature elle-même pendant un très long nombre d'années et indépendamment de toutes influences extérieures ou variations climatériques. Il est en effet curieux à remarquer que les cellules créées 10 ou 20 ans plus tard ont la tendance de soutenir la continuité presque géométriquement exacte des lignes de force et de surfaces équipotentielles de leur tissu.

Notre *fig.* 13 présente un cas plus compliqué encore. Ici nous avons deux groupes à deux pôles, chaque groupe développé indépendamment, suivant les mêmes lois que tout à l'heure; à la fin,

---

[1] Cette coupe est faite quelques centimètres au-dessus d'une bifurcation d'un bois de chêne.

les deux groupes sont entourés de lignes communes faisant ainsi un ensemble très intéressant au point de vue théorique.

Passons maintenant aux perturbations des champs cellulaires

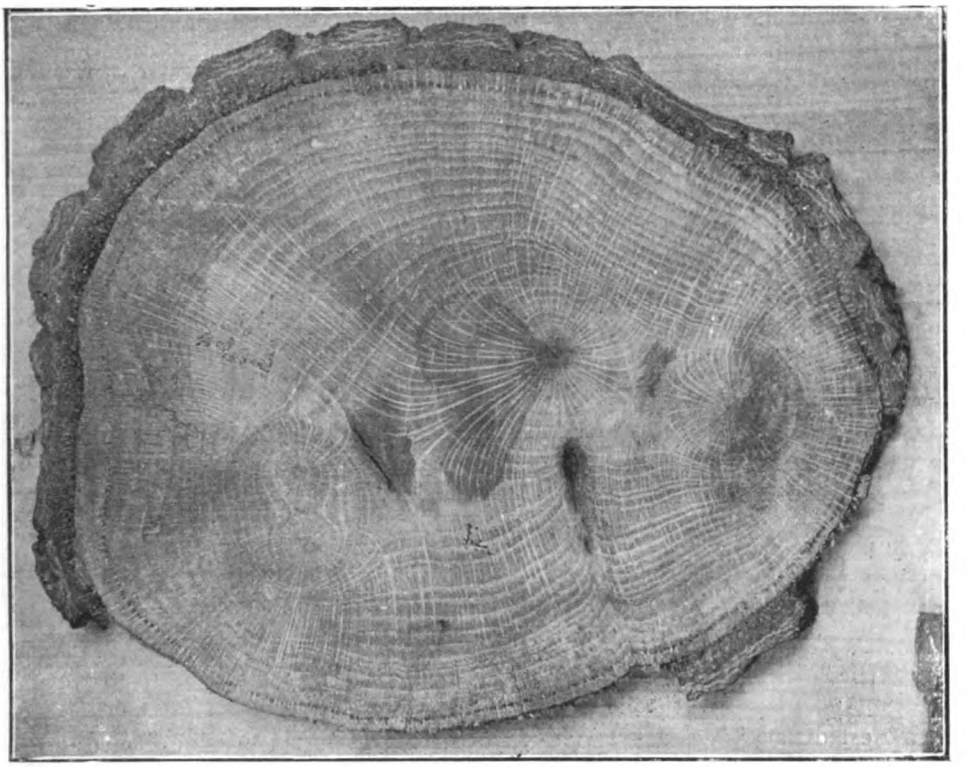


Fig. 13. — Coupe d'une branche de chêne. Quatre pôles.

Nous allons trouver ici aussi les mêmes phénomènes que nous avons déjà observés dans les perturbations de champs électriques ou magnétiques.

Un nœud, quand il se trouve dans un champ cellulaire homogène ou hétérogène, produit toujours des perturbations du champ considéré. Les nœuds qui ne sont autre chose que les liens des tiges secondaires (ou de branches) jouent ici les rôles des pôles ou des courants isolés. De même que ceux-ci, les nœuds ont aussi leurs propres lignes de force et surfaces équipotentielles, et quand ils

se trouvent dans un champ, les lignes et les surfaces du champ sont absorbées par des nœuds ou forcées de suivre, jusqu'à une certaine distance, la marche des lignes et des surfaces des nœuds.

Prenons d'abord un champ cellulaire avec un seul nœud. La perturbation doit être la même que quand elle est produite par un pôle magnétique ou électrique isolé. Nous avons eu ce cas représenté par la *fig.* 4. Notre *fig.* 14 démontre l'identité presque complète des deux phénomènes.

Nous avons vu, dans la *fig.* 5, quel aspect prend un champ homogène, troublé par deux pôles magnétiques (ou électriques) de même nom et de même force. En présentant ici la *fig.* 15 qui est un champ homogène d'un bois de sapin, troublé par deux nœuds, nous n'avons pas besoin de l'expliquer plus spécialement.

La perturbation d'un champ homogène par deux pôles de noms contraires a été représentée par la *fig.* 6. Dans la *fig.* 16 nous voyons un cas analogue, où les deux côtés opposés d'un nœud jouent le rôle de deux pôles de noms contraires et produisent le même effet dans un champ homogène cellulaire.

En résumant toute cette série de champs cellulaires que nous venons d'observer et qui ne s'accorde pas seulement en général mais aussi en les plus petits détails avec les champs correspondants électromagnétiques, on ne peut pas dire que tout cela est dû au pur hasard. Il est au contraire plus naturel de croire que, dans les deux cas, nous avons affaire avec des phénomènes sinon tout à fait identiques, au moins avec des phénomènes analogues, produits par des forces obéissant aux mêmes lois. Autrement dit, nous avons pu constater certaines analogies entre les actions électromagnétiques d'un côté et cellulaires de l'autre. De ces analogies, une fois constatées, on peut tirer d'autres conclusions très importantes, que nous allons étudier dans les pages suivantes.

La loi des forces centrales a été pour la première fois constatée dans les attractions des planètes de notre système solaire. Cette loi, formulée par Newton (1685) et connue sous son nom, est la suivante :

Deux corps s'attirent proportionnellement à leurs masses et inversement aux carrés de leurs distances.

Désignons par m et m' les deux masses qui s'attirent, par r leur distance, par k la constante de gravitation et par f la force attractive résultante ; on peut écrire la loi de Newton sous la formule :

$$f = k \frac{m m'}{r^2}.$$

Quand, vers la fin du dernier siècle, les phénomènes électriques et magnétiques furent étudiés plus spécialement, le savant français *Coulomb* trouva que cette même loi est applicable à ces phé-

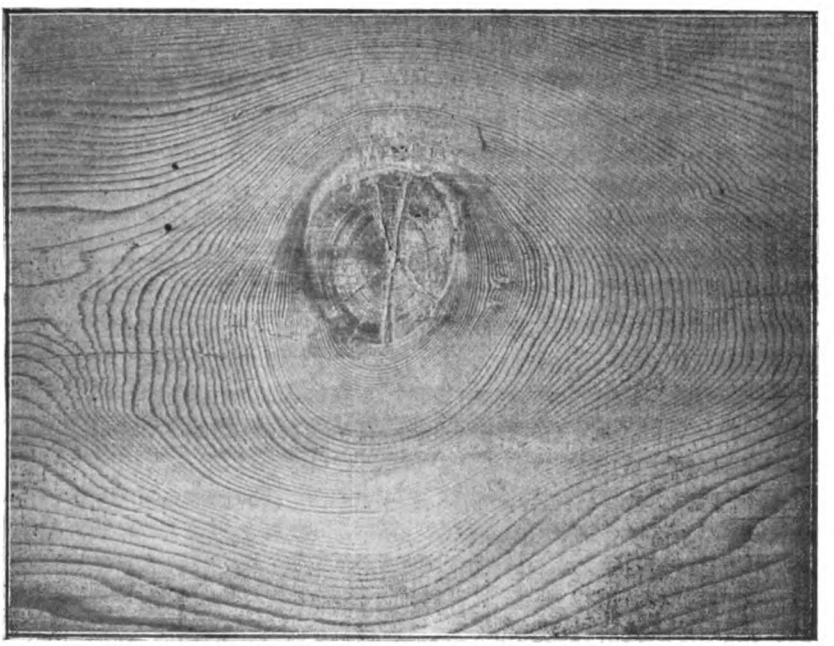


Fig. 14. — Perturbation d'un champ cellulaire produite par un nœud.

nomènes. Il est en effet connu que, d'après la loi de Coulomb, l'attraction (ou répulsion) de deux masses électriques ou magnétiques est directement proportionnelle à leurs grandeurs et inversement proportionnelle au carré des distances. En désignant par

e et e_2 les deux masses électriques (ou magnétiques), par r leur distance et par k une constante, on a :

$$f = \pm k \frac{e_1 e_2}{r^2}.$$

Dans les deux formules les constantes signifient l'action de deux masses égales à l'unité et à l'unité de distance. Dans la deuxième formule, l'attraction est désignée par le signe — et la répulsion par +.

Avec l'introduction de la notion du travail dans la science, on a trouvé que les forces centrales peuvent produire un travail positif ou négatif. Un point se trouvant dans un champ électrique (ou magnétique) produit un travail en se déplaçant suivant une ligne de force entre deux surfaces du niveau. Ce travail est nul si le point se déplaçant reste toujours dans la même surface équipotentielle. De cette façon on a introduit, par l'action des forces centrales, la notion des lignes de force et des surfaces équipotentielles en électricité et magnétisme.

Nous avons vu que, partout où deux ou plusieurs masses s'attirent d'après la loi des forces centrales, nous avons affaire à un champ contenant des lignes de force et des surfaces équipotentielles, dont nous avons étudié la forme et la nature dans la première partie de ce rapport. De même inversement, quand on trouve quelque part, dans la nature, des lignes de force et des surfaces équipotentielles dessinées et toutes faites, on est autorisé à dire qu'elles proviennent de forces centrales agissant d'après la loi de Newton ou Coulomb. Nous ne savons pas de quelle façon et d'après quelles lois agissent les cellules dans les tissus organiques entre elles. Nous venons pourtant de voir que des stries et des lignes que tout le monde connaît, sur les sections de certaines plantes et bois, ne sont autre chose que les systèmes des lignes de force et des surfaces équipotentielles dressées par la nature avec une aussi grande précision et exactitude que celles qu'on dessine théoriquement depuis longtemps dans la science électrique et magnétique. Il s'ensuit par conséquent que les actions intracellulaires dans les plantes suivent les lois des forces centrales.

En poursuivant l'étude des champs cellulaires, nous avons trouvé des lemniscates très bien développées, même sur des coupes

de certaines graines d'amidon. Il y a beaucoup de plantes et de bois où les cellules ne sont pas différenciées pour montrer les lignes de force et les surfaces équipotentielles. Mais nous savons pourtant que, même en magnétisme, nous ne voyons que des lignes de

Fig. 15. — Deux nœuds dans un champ cellulaire homogène.

force et cela indirectement (à l'aide des limailles de fer); les surfaces équipotentielles magnétiques, nous ne les voyons pas,

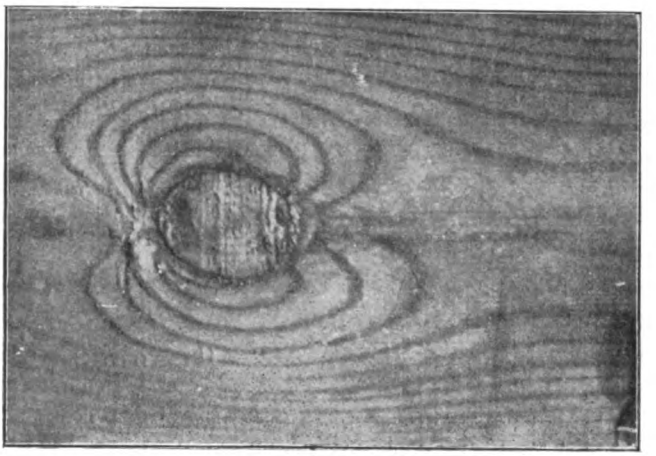


Fig. 16. — Deux pôles cellulaires dans un champ homogène.

quoique leur marche nous soit très bien connue. De même il y a des plantes où les cellules sont différenciées seulement dans la direction des lignes de force (par exemple dans les radis) comme

il y en a où cette différenciation n'est faite que suivant des surfaces équipotentielles (l'oignon, le bois de sapin, etc.). Enfin nous avons vu qu'il y a des plantes (le bois de chêne et autres) où l'on trouve les lignes et les surfaces dans le même champ, dessinées avec une étonnante exactitude par la nature, et cela même pendant un très long nombre d'années. Il s'ensuit que même dans les plantes où cette différenciation des cellules n'existe pas, ou qu'elle n'est pas suffisamment visible (par exemple dans le bois de tilleul), ces mêmes lois sont valables, car il est impossible d'admettre que les lois d'action cellulaire sont différentes pour différents groupes de plantes.

Il nous reste encore une question : les lois que nous avons trouvées valables pour les plantes sont-elles applicables aussi pour le règne animal? En d'autres termes : toute la nature organique est-elle réglée par de mêmes lois? — Personnellement, nous n'avons pas eu l'occasion d'observer directement les phénomènes caractéristiques que nous avons connus plus haut, soit parce que la différenciation de ces tissus n'est pas suffisamment développée, soit parce que nous ne sommes pas assez instruit pour savoir les voir. En tout cas, nous pouvons remarquer que les stries que tout le monde connaît sur l'ivoire et autres parties du corps animal nous donnent des signes que les cellules animales se rangent et se fixent suivant des lois déterminées. Les grandes analogies qui existent dans la vie des plantes et des animaux nous autorisent à croire que les cellules végétales et les cellules animales sont soumises aux lois identiques et que ces lois sont identiques à celles qui règlent les phénomènes électriques et magnétiques ou d'après lesquelles s'exécutent les mouvements des corps célestes.

De toutes ces considérations nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

A. Pour la nature organique :

I. Les cellules [1] agissent l'une sur l'autre, proportionnellement à leurs masses, et inversement au carré des distances.

II. Les cellules se déplacent et se fixent suivant des lignes de force et des surfaces équipotentielles.

---

[1] Pour le moment végétales, mais probablement aussi les cellules animales.

B. Pour la nature tout entière :

I. Les parties de la matière agissent les unes sur les autres proportionnellement à leurs masses et inversement aux carrés des distances.

II. Chaque partie de la matière se déplace et se fixe suivant des lignes de force et des surfaces équipotentielles.

TABLE DES MATIÈRES.

PREMIÈRE SECTION.

Pages.

Redressement des courants alternatifs; par M. HILDBURGH..... 1
Application mécanique des phénomènes électriques; par M. F. WEYDE..... 5
Nouveaux oscillographes pour l'inscription des courbes périodiques des courants alternatifs; par M. A. BLONDEL..... 7
Fréquence-mètre de M. R. KEMPF-HARTMANN..... 32
Application des oscillographes à l'étude des alternateurs; par MM. A. BLONDEL, DOBKÉWITCH, DURIS, FARMER et TCHERNOSVITOFF..... 39
Télévision au moyen de l'électricité; par C. PERSKYI..... 54

DEUXIÈME SECTION.

SOUS-SECTION A.

Sur la prédétermination de la chute de tension dans les alternateurs polyphasés par la théorie des deux réactions; par M. JEAN REY..... 57
Sur le compoundage des alternateurs; par A. BLONDEL..... 74
Observations et mesures relatives au fonctionnement d'une grande transmission d'énergie électrique à haute tension; par M. SEMENZA..... 96
De l'accouplement des alternateurs au point de vue des harmoniques et effet des moteurs synchrones sur ceux-ci; par A. PEROT..... 111
Théorie graphique des convertisseurs; par M. A. BLONDEL..... 115

SOUS-SECTION B.

Rendement lumineux de l'arc à courant alternatif; par MM. A. BLONDEL et JIGOUZO..... 155
Rendement comparatif des arcs à courants continus et alternatifs; par MM. A. BLONDEL et JIGOUZO..... 183
Lampes à incandescence sans culot système Hollub; par LORCAY..... 195
Essai de charbons pour lampes électriques; par A. BLONDEL..... 196

SOUS-SECTION C.

Prix courant pour traction électrique; par M. E. BÈDE..... 203

TROISIÈME SECTION.

Pages.
Les principes de l'analyse électrolytique; par A. HOLLARD..... 208
Analyse du cuivre industriel par voie électrolytique; par A. HOLLARD..... 216

QUATRIÈME SECTION.

Système téléphonique à batterie centrale; par H. ANDRÉ..... 227
Application directe d'un récepteur téléphonique à la télégraphie sans fil; par A. POPOFF..... 236
Sur la télégraphie sans fil; par M. TISSOT..... 240
Dirigeabilité des appareils de télégraphie par les ondes électriques; par M. BLOCHMANN..... 242
Sur l'application des microphones sous-marins à la sécurité des pêcheurs des bancs de Terre-Neuve; par M. CHAYE-PACHA..... 246
Les canalisations téléphoniques souterraines; par A. ROOSEN..... 250
Télégraphe automatique imprimant en écriture cursive système POLLAK et VIRAG; par PINTER..... 263
Transmetteur télégraphique à ondes sinusoïdales; par MM. SQUIER et CREHORE..... 276
Sur les cohéreurs décohérents et sur un essai de théorie des cohéreurs en général; par G. FERRIÉ..... 285
Expériences sur les mouvements de la limaille dans les cohéreurs; par J. SEMENOV..... 295

CINQUIÈME SECTION.

Les lignes de force et les surfaces équipotentielles végétales; par G. STANOIEVITCH..... 298

FIN.

31805 Paris. — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS, quai des Grands-Augustins, 55.

Princeton University Library
32101 048879579